

Entwicklung, Kalibrierung und praktischer Test eines EDV-gestützten hydrostatischen Mess-Systems

Robert Theißen
Mützenich

Disbui. Bochum
1987

ENTWICKLUNG, KALIBRIERUNG UND PRAKTISCHER TEST EINES
EDV-GESTÜTZTEN HYDROSTATISCHEN MESS-SYSTEMS

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Bauingenieurwesen

der Ruhr-Universität Bochum

von

Robert Theißen

Mützenich

Bochum 1987

Dissertation eingereicht am : 1.7.87

Tag der mündlichen Prüfung : 9.11.87

Erster Referent : Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Benning

Zweiter Referent : Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Witte

Dritter Referent : Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. A. Schultz

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	5
2. KRITERIEN FÜR DIE GEWÄHLTE MESSMETHODE	9
3. DARSTELLUNG DES ENTWICKELTEN SYSTEMS	15
3.1. AUFBAU UND BESCHREIBUNG DER DIGITALWAAGE KRUPS ADDITRONIC ALS SENSOR	15
3.2. GEFÄSSE, MESSFLÜSSIGKEIT UND VERBINDUNGSSCHLAUCH	23
3.2.1. Beschreibung der Einzelteile	23
3.2.2. Auflösung als Funktion der Gefäßgröße	24
3.2.3. Meßbereich als Funktion der Gefäßgröße	25
3.3. DATENERFASSUNG	27
3.3.1. Der Tischrechner Commodore C64	27
3.3.2. Der Frequenzzählerbaustein	28
3.3.3. Sonstige Hardware	29
3.3.4. Systemsoftware	32
3.4. INBETRIEBNAHME DES SYSTEMS	36
4. UNTERSUCHUNG UND KALIBRIERUNG DES SYSTEMS	38
4.1. DER SENSOR	39
4.1.1. Reproduzierbarkeit des Ausgangssignals	39
4.1.2. Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs zwischen der Belastung des Wägebalkens und der erzeugten Frequenz	40
4.1.3. Bestimmung der Auflösung des Sensors	42
4.1.4. Drift des Ausgangssignals	43
4.1.5. Niveauänderung der Aufsetzfläche bei Belastung	45

4.1.6.	Temperaturabhängigkeit des Sensors	48
4.1.7.	Spannungsabhängigkeit des Sensors	52
4.1.8.	Einfluß von Luftdruckschwankungen auf den Sensor	53
4.1.9.	Einfluß von Schiefstellungen des Sensors	54
4.1.10.	Zuverlässigkeit der Parallelführung	56
4.2.	GEFÄSSE UND MESSFLÜSSIGKEIT	57
4.2.1.	Einfluß der Genauigkeit des Gefäßradius auf die Genauigkeit der Höhenmessung	57
4.2.2.	Gefäßgröße und Dichteschwankung der Meßflüssigkeit im Verbindungsschlauch	58
4.3.	FREQUENZZÄHLER	60
4.4.	KALIBRIERUNG DES SYSTEMS	62
4.4.1.	Einzelne Meßeinheit und Datenerfassung	62
4.4.2.	Mehrstellensystem mit 5 Sensoren	63
5.	ZUR AUSWERTUNG EINES MEHRSTELLENSYSTEMS	64
5.1.	DAS FUNKTIONALE MODELL DES MEHRSTELLENSYSTEMS	64
5.2.	FEHLERFORTPFLANZUNG IM MEHRSTELLENSYSTEM	68
6.	ERSTE ERFAHRUNGEN IM PRAKTISCHEN EINSATZ	70
6.1.	MESSUNG UNTER DEM EINFLUSS MECHANISCHER STÖRUNGEN	70
6.2.	MESSUNG OHNE MECHANISCHE STÖRUNGEN	75
7.	AUSBLICK UND ZUSAMMENFASSUNG	81
7.1.	WEITERENTWICKLUNG DER HARDWARE	81
7.2.	ZUSAMMENFASSUNG UND WERTUNG	83
8.	LITERATURVERZEICHNIS	85

1. EINLEITUNG

Den Anstoß zu dieser Arbeit gaben Überlegungen zu der Frage, wie man mit möglichst geringem Aufwand vertikale Veränderungen an Bauwerken kontinuierlich erfassen, registrieren und darstellen könne. Zur exakteren Eingrenzung der Aufgabenstellung wurde dabei gedacht an

- Bauwerke mit Ausmaßen im Bereich von 100 Metern,
- vertikale Punktverlagerungen im Bereich von einigen Zentimetern,
- langfristige Punktveränderungen mit Deformationsfrequenzen von 10^{-4} Hz und kleiner und
- eine Aufnahme- oder Meßunsicherheit im Bereich von $< \pm 0.5$ mm.

Diese Überlegungen stehen in engem Zusammenhang mit der Region Ruhrgebiet, in der solche vertikalen Punktbewegungen an Bauwerken bergbaubedingt an der Tagesordnung sind.

Als weitere, artverwandte Anwendungen für die gesuchte Meßeinrichtung lagen nahe

- Deformationsmessungen zur Bestimmung von temperaturbedingten Verformungen, wie sie zum Beispiel durch den Tagesgang der Sonne an Brücken verursacht werden, und
- Setzungs- und Senkungsmessungen nach DIN 4107, deren Anforderungen erfüllt sein sollen mit Ausnahme des für besonders empfindliche Bauwerke geforderten mittleren Fehlers des beobachteten Höhenunterschiedes von ± 0.1 mm.

Die Geschichte der Messungen zur Bestimmung solcher Verformungen bildet einen wesentlichen Teil der Geschichte der Ingenieurvermessung und behandelt in einer Fülle von Beispielen die unterschiedlichsten Methoden zur Lösung dieser Aufgabenstellung.

Wenn nun trotzdem der Versuch unternommen wird, diese Problematik erneut anzufassen, so geschieht dies

- mit dem Ziel, eingefahrene Wege zu überdenken und auf ihre Übereinstimmung mit dem Stand der Technik zu überprüfen, und
- aus dem Anreiz, eine Alternative auf ihre Möglichkeiten und Grenzen zu untersuchen.

Die Hauptzielsetzung der Arbeit soll jedoch in einer konsequenten Umsetzung des "LOW-COST"-Gedankens bei der Zusammenstellung des erforderlichen Instrumentariums gesehen werden. Dieses Prinzip wird abgeleitet aus der Erkenntnis, daß eine offensichtliche Diskrepanz besteht zwischen der Fülle der veröffentlichten Lösungsmöglichkeiten, modernste Meß- und Auswertegerätschaften mit Zielrichtung Genauigkeitssteigerung eingeschlossen, und der Anzahl der für die und in der täglichen Praxis realisierten und eingesetzten Systeme, wobei die Gründe für diese Diskrepanz sicherlich zum großen Teil in den Kosten zu suchen sind, die bei der Erstellung von Einzelsystemen anfallen. Bei dem neu zu entwickelnden System sollte deshalb das Hauptaugenmerk darauf gerichtet sein, die Kosten durch Verwendung von im Handel erhältlichen Modulen aus Großserien so niedrig wie möglich zu halten. Die Module sollten wie mit einem Baukastensystem zusammenstellbar sein, wobei von Anfang an nicht an ein Präzisionsmeßsystem gedacht war.

Vor der grundsätzlichen Entscheidung, nach welchem Verfahren die Höhenänderungen zu ermitteln sind, müssen alle Methoden in Betracht gezogen werden, die systemimmanent Bezug zu einer natürlichen oder künstlich erstellten Horizontalen nehmen und eine automatische Weitergabe von Informationen ermöglichen. Als solche kommen in Frage :

- a) hydrostatische Meßsysteme,
- b) Lasersysteme mit selbsthorizontierenden Rotationslasern und positionsempfindlichen Dioden und
- c) Pendelneigungsmeßsysteme.

Alle diese Systeme zeichnen sich dadurch aus, daß sie nur *r e l a t i v e* Höhenänderungen zwischen zwei oder mehreren Punkten erkennen und nur solche sind hier von Interesse. Systeme mit der Fähigkeit, *a b s o l u t e* Höhenänderungen eines Einzelpunktes zu erkennen - gravimetrische Geräte oder neuerdings Satellitenvermessungssysteme -, sind zumindest zur Zeit noch sowohl von den Kosten als auch von der Handhabung her gesehen ohne jede praktische Relevanz für die vorliegende Aufgabenstellung.

Bei allen genannten Systemen sind automatischer Betrieb, Registriermöglichkeit und nachgeschaltete Intelligenz denkbar und in zahlreichen Anwendungen realisiert, so daß die Kriterien für die Entscheidung zwischen den Systemen bei den Sensoren selber ansetzen müssen. Als Sensor soll dabei jeder Baustein einer Meßeinrichtung verstanden werden, der in der Lage ist, Höhenänderungen zu "erfühlen" und in abfragbare Informationen umzusetzen.

Gegen die weitere Inbetrachtung von Lasersystemen spricht als Argument, daß sie freie Sicht benötigen zwischen dem zentral aufzustellenden Rotationslaser und den positionsempfindlichen Dioden, die an den bewegungsgefährdeten Punkten anzubringen sind. Bei einem denkbaren Einbau der Meßeinrichtung im Kellergeschoß von Gebäuden wäre diese Bedingung fast nie einzuhalten.

Für die unter c) genannten Neigungsmeßsysteme können als Beispiele die Systeme TALYVEL, Q-FLEX und SCHAEVITZ genannt werden, für die eine Fülle von praktischen Einsätzen bekannt ist /EICHHOLZ, SCHÄFLER 1982, HAGEMANN 1978, INGENSAND 1985, MÖHLENBRINK 1976, THIEMANN 1984/. Bei Sensorkosten > 3.000,- DM war dieser Lösungsweg von vornherein ausgeschlossen. Auch bereitet die Tatsache, daß Höhenunterschiede aus Neigungsmessungen nur mit Hilfe einer Integration über den Weg zu erhalten sind und daß dies bei den genannten Geräten einer Extrapolation von einer ca. 10 cm langen Basis auf eine je nach Sensorabstand hundert- und mehrfache Meßlänge gleichkommt, bei den oft sehr differenziert strukturierten Meßobjekten und den temperaturempfindlichen Sensoren häufig Auswerteprobleme hinsichtlich der praktisch verwertbaren Bedeutung der Ergebnisse.

Als Basis der neuen Entwicklung konnte daher nur das hydrostatische Meßprinzip Anwendung finden, dessen Theorie in /BUSCH 1981/ ausführlich behandelt ist.

2. KRITERIEN FÜR DIE GEWÄHLTE MESSMETHODE

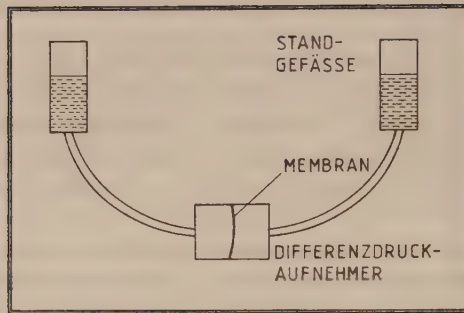
Die Geschichte der hydrostatischen Meßsysteme und die Vielfalt der Methoden und Gerätschaften sind in /THIERBACH 1980/ umfassend zusammengetragen. Viele der darin vorgestellten Lösungen mußten wegen der Kosten der verwendeten Sensoren außer Betracht bleiben. Im Hintergrund der zu treffenden Entscheidung stand schon bald der Gedanke, die Höhe der Wassersäule durch Wägung zu ermitteln, zumal die dafür ins Auge gefaßte Waage und ihr Preis einen wesentlichen Maßstab darstellten, an dem sich alle weiteren Möglichkeiten quantitativ-qualitativ messen lassen mußten. Da außerdem bei einigen Verfahren patentrechtliche Hindernisse einer Weiterentwicklung vom Präzisionsinstrument in Richtung kostensenkender Vereinfachung unter Berücksichtigung der oben genannten Anforderungen im Wege standen, war der Entschluß schnell gefaßt, eine handelsübliche Digitalwaage in den Mittelpunkt der weiteren Untersuchungen zu stellen.

Die Bestimmung der Höhe der Wassersäule in den Standgefäßen aus ihrem Gewicht ist bisher nur in wenigen Ausführungen angegangen worden, so von der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik (HBM), die auf der INTERKAMA 1983 in Düsseldorf einen Versuchsaufbau mit einem Differenzdruckaufnehmer zeigte. Bei diesem Aufbau wurde in einem Zweistellenmeßsystem (Abb. 2.1) ein Differenzdruckaufnehmer an der tiefsten Stelle des Systems eingebaut, so daß eine Höhenänderung eines der Aufhängepunkte sich in einer Änderung des Differenzdruckes und damit einer abgegebenen Spannung äußerte. Dieses System hat zwar das Handicap relativ hoher Kosten für den Differenzdruckaufnehmer, weist jedoch schon die Vorteile auf, die gewichtsmessenden Systemen bei temperaturbedingten Dichteänderungen in der Meßflüssigkeit eigen sind.



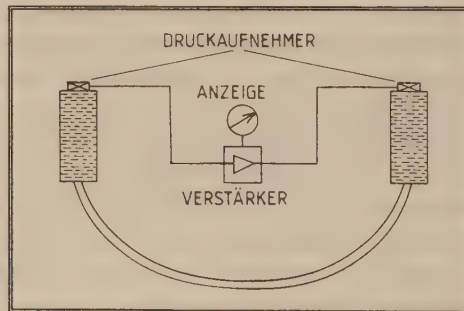
Abb. 2.1 :

Schlauchwaage
mit Differenz-
druckaufnehmer



In /WITTMANN 1977/ wird über eine weitere Ausführung berichtet (Abb. 2.2), die mit Druckaufnehmern ausgestattet ist. Bei seiner Patentanmeldung wird die Schlauchwaage als ein hermetisch abgeschlossenes, mit Meßflüssigkeit vollständig gefülltes System vorgeschlagen, bei dem die Druckaufnehmer an der Gefäßoberseite angebracht sind. Nach Veränderung einer Ausgangsstellung gleichen Drucks durch eine Höhenverlagerung eines Punktes kann ebenfalls eine Druckdifferenz gemessen

Abb. 2.2 :
Schlauchwaage
nach WITTMANN



werden, die in einer Kalibrierung als Funktion des Höhenunterschiedes dargestellt werden kann.

Schließlich berichten /BUSCH 1985/, /BUSCH, WITTE 1986/ und /DAMES 1987/ über ein neu entwickeltes hydrostatisches Meßsystem, das auf der Basis von elektrischen Druckaufnehmern arbeitet und mit dem die Möglichkeiten der Meßbereichserweiterung erforscht werden sollen, so daß auch größere Höhenunterschiede mit einer Schlauchwaage überbrückt werden können.

Den Schritt von der Druckmessung zur Gewichtsmessung findet man dann in den Ausführungen von /LÜSSENHOP 1986/, in denen ein Mehrstellenmeßsystem und sein Einsatz bei der Bauwerksüberwachung beschrieben wird. Dabei werden Dehnungsmeßstreifen an Wiegebalken als Wägezellen eingesetzt, die die Information über die Höhe des Wasserstandes im Gefäß aus dem Gewicht der Meßflüssigkeit ableiten. Die Sensoren werden über eine zentrale Verstärkeranlage mit Spannung versorgt und abgefragt. Jeder dieser Sensoren liegt aber im Preis noch sehr deutlich über dem der für diese Arbeit ausgesuchten Digitalwaage.

/LÜSSENHOP 1986/ stellt bereits als einen wesentlichen Vorteil der Gewichtsmessung heraus,

- daß Höhenänderungen des Niveaus der Meßflüssigkeit, die durch temperaturbedingte Dichteänderungen der Meßflüssigkeit im Standgefäß verursacht sind, keinen Einfluß auf die Meßgenauigkeit haben und daß deshalb Temperaturmessungen im Standgefäß nicht erforderlich sind.

Hinzu kommt noch der die Meßgenauigkeit und Zuverlässigkeit des Systems betreffende Gesichtspunkt,

- daß es im Gegensatz zu anderen Lösungsansätzen /BUSCH 1981; THIERBACH, BARTH 1976/ keine sich be-

wegenden Teile zur Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche gibt und alle in diesem Zusammenhang in der Literatur genannten Probleme und Schwierigkeiten entfallen.

Infolge der guten Erfahrungen, die im Labor des Institutes für Vermessungswesen der Ruhruniversität Bochum bei der Meßwerterfassung mit dem Kleincomputer Commodore C64 gemacht wurden, fiel die Entscheidung für dieses preiswerte und leistungsfähige Gerät als zentrale Datenverarbeitungsanlage. Die fehlenden Zwischenglieder - Spannungsversorgung, Meßwertabgriff und -umschaltung - wurden dann als Zubehörteile für den weitverbreiteten Rechner schnell gefunden und integriert.

Ziel des Rechnereinsatzes ist es, mit Bezug auf eine Nullmessung und durch entsprechende Auswertalgorithmen Niveauveränderungen der Meßflüssigkeit, die sich in allen Gefäßen gleichermaßen zeigen müßten, unschädlich zu machen. Solche Niveauänderungen könnten verursacht sein durch

- die partielle Verdunstung der Meßflüssigkeit, die systemunschädlich auch von Gefäß zu Gefäß unterschiedlich sein kann,
- eine temperatur- oder alterungsbedingte Veränderung des Durchmessers des Verbindungsschlauchs,
- eine temperaturbedingte, einheitliche Dichteänderung der gesamten Meßflüssigkeit im Verbindungsschlauch,
- kleine Leckagen, die andererseits durch eine Festsetzung von Grenzwerten aufgedeckt werden müssen, wenn sie Beträge von mehreren cm^3 pro Tag über-

schreiten,

- kleine Blasen, die oft über Stunden sichtbar an der Oberseite des durchsichtigen Verbindungsschlauches entlangwandern, die , sobald sie zu einem Sensor gelangen, dort die gewogene Flüssigkeitsmenge kurzfristig verringern, bevor das System wieder zum hydrostatischen Gleichgewicht findet,
- ein gezieltes Nachfüllen der Meßflüssigkeit aufgrund eines Flüssigkeitsverlustes oder zwecks Überprüfung der Kalibrierung.

Diese auswertetechnische Elimination gilt gleichermaßen für nur vorgetauschte Gewichtsänderungen der Gefäßinhalte, die verursacht werden durch

- solche Einflüsse von Temperaturänderungen, die alle Sensoren in gleichem Maße betreffen, oder
- den einheitlichen Anteil der Drift der Nullfrequenzen aller Sensoren (Kap. 4.1.4).

Da das neu zu entwickelnde System unter Verzicht auf die Zielrichtung Präzisionsmessung mit Genauigkeiten der Höhenmessung $\leq \pm 0.1$ mm konzipiert wurde und dafür eher niedrige Systemkosten, schnelle Handhabung und Transportabilität im Vordergrund standen, konnten und mußten gegenüber Präzisionsmeßsystemen folgende Vereinfachungen vorgenommen werden :

- Das System bleibt offen , so daß der Druckausgleich nur über den freien Raum erfolgen kann. Luftdruckdifferenzen werden daher nicht ausgeglichen, spielen bei der begrenzten Ausdehnung der vorgesehenen Meßobjekte und normalen, wetterbe-

dingten Horizontalgradienten des Luftdrucks auch keine Rolle. Der Einfluß von Luftströmungen, der nach /BUSCH, FITZEN 1977/ die Messungen verfälschen kann und der nach /PÖTZSCHNER 1955/ auch bei relativ niedrigen Windgeschwindigkeiten von etwa 1 m/sec in einem Bereich von ca. 50 m Durchmesser zu Druckdifferenzen bis zu 0.05 mbar entsprechend 0.5 mm Wassersäule führen kann, wird durch Schutzkästen zu mindern versucht.

- Überlegungen über eine Optimierung des Einschwingverhaltens können entfallen, da die gesuchten Verformungen extrem niederfrequent sind. Bei Mehrstellensystemen ist daher eine linienweise Aneinanderreihung der Sensoren vorgesehen.
- Da das System in kürzester Zeit aufbaubar und einsatzbereit sein soll, können keine Veränderungen an den Modulen zwecks Aufhängung an Höhenpunkten vorgenommen werden. Die Sensoren sollen auf dem Boden oder auf Wandkonsolen unter einem Schutzkasten aufgestellt werden.
- Temperaturmessungen zur Korrektur des Einflusses von Dichteänderungen der Meßflüssigkeit im Verbindungsschlauch sind nicht vorgesehen, vielmehr wird durch möglichst horizontale Verlegung des Schlauches versucht, diesen Einfluß zu eliminieren.

3. DARSTELLUNG DES ENTWICKELTEN SYSTEMS

3.1. AUFBAU UND BESCHREIBUNG DER DIGITALWAAGE KRUPS ADDITRONIC ALS SENSOR

Bei der Suche nach einer geeigneten Waage mit elektrischer Anzeige und einem tragbaren Preis war die Auswahl von Beginn an nicht sehr groß. Die meisten am Markt angebotenen Geräte, von denen die SÖHNLE COURIER 8800 stellvertretend genannt sein soll, liegen um 500,- DM und bieten damit im Verbund mit einem Schlauchwaagensystem keine preisliche Alternative gegenüber anderen Verfahren. Dies gilt um so mehr für Laborwaagen mit elektrischer Anzeige und zum Teil eingebauter Intelligenz (z.B. zur Mittelbildung und Berechnung von Standardabweichungen bei Serienwägungen), für die die Modelle von METTLER (z.B. PE6) oder KERN (z.B. KERN 550) exemplarisch genannt sein sollen und die sich in der Preisklasse von ca. 1.500,- DM bewegen.

Parameter	KRUPS ADDITRONIC	SOEHNLE GOURMET	SOEHNLE DIGITA	SOEHNLE DIGITA S
Preis	119,- DM	89,- DM	99,- DM	129,- DM
Höchstlast	2 kg	1 kg	1 kg	2 kg
Auflösung	2g < 1 kg 5g > 1 kg	1g < 64g 2g > 64g	1g < 64g 2g > 64g	2g < 126g 5g > 126g
Meßgenauigkeit	sehr gut	gut	gut	gut
Korrosionsbeständigk.	sehr gut	mangelhaft	befried.	befried.
Technische Prüfung	sehr gut	gut	gut	gut
GESAMTURTEIL	sehr gut	gut	gut	gut

Tab. 3.1. : Beurteilung potentieller Sensoren
in Heft 1/86 der Stiftung Warentest

Im Testheft 1/86 der Stiftung Warentest wurden bei einem Vergleich von Diätwaagen vier Modelle mit Digitalanzeige bewertet, die als potentielle Sensoren für das neu zu entwickelnde System angesehen werden konnten. Die für die geplante Aufgabe relevanten Bewertungsergebnisse sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

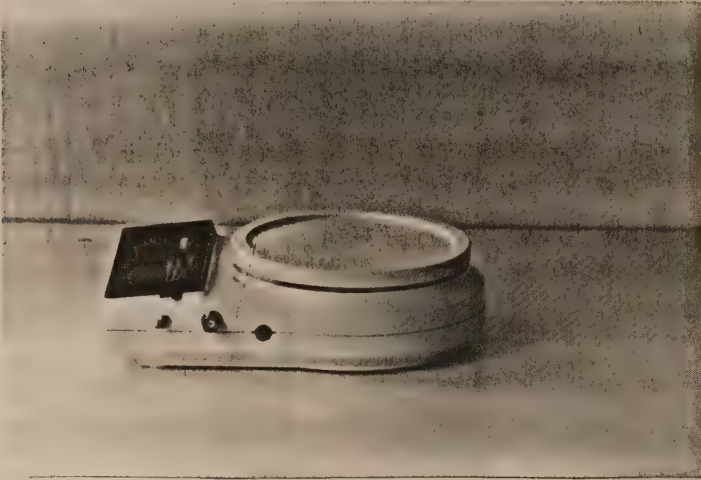


Abb. 3.1 : Digitalwaage KRUPS ADDITRONIC

Aufgrund dieser Beurteilung wurde zunächst ein Exemplar der Digitalwaage KRUPS ADDITRONIC (Abb. 3.1) erworben und zu Testzwecken in seine einzelnen Komponenten zerlegt. Dieses Modell erschien als geeignet,

- weil es mit einem aktuellen Preis von weniger als 100,- DM die Sensorkosten dem "LOW-COST"-Bereich zuzuordnen gestattet,
- weil die Firmenangaben des Meßbereichs und seiner Auflösung (2 g < 1000 g und 5 g < 2000 g) einen Sensor der 2‰-Klasse spezifizieren, eine Güte-

klasse, in der elektrische Sensoren schon als hochwertig zu bezeichnen sind,

- weil beides zusammen ein Preis-Leistungsverhältnis ergibt, das von keiner weiteren Ausführung von Digitalwaagen bekannt ist, und
- weil die Waage durch einen Stromausfall die Information über ihre Belastung nicht verliert und daher auch für den Einsatz in einem System geeignet ist, das nach einem Stromausfall selbständig aufstartet.

Das Äußere der Waage gliedert sich in

- den Anzeigeteil mit Bedienungselementen wie Einschaltknopf, Additionstaste und Digitalanzeige und
- die Wägefläche, die im normalen Betrieb eine Plastikschüssel zur Aufnahme des Wägematerials trägt.

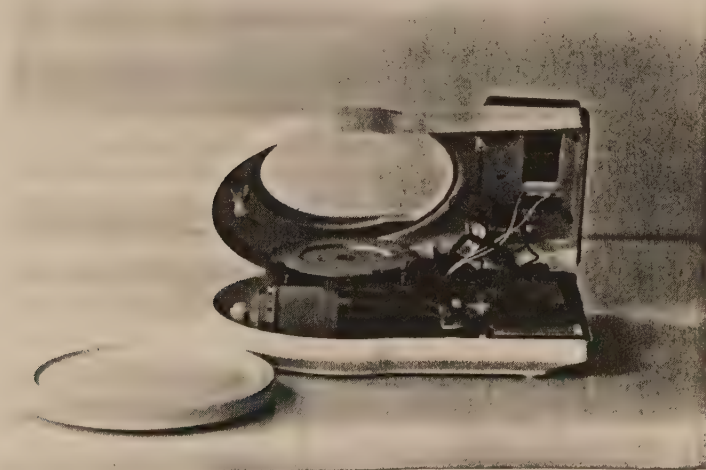


Abb. 3.2 : Das Innere des Sensors

Diese Aufgliederung findet ihre Entsprechung im Inneren der Waage, das nach Lösen von drei kleinen Schrauben zugänglich wird (Abb. 3.2). Nach Abnahme der runden Plasticscheibe am Wägeteil mit einer Drehung nach rechts liegt eine Metallkonstruktion frei, die als Wägearm mit Parallelführung ausgebaut ist (Abb. 3.3) und die als untersten Baustein eine Metallplatte besitzt, die als Teil eines Kondensators eingesetzt wird. Dies ist erkennbar an den beiden Kabelzuführungen, die sie und die ihr im Abstand von ca. 2 mm gegenüberliegende Metallplatte mit unterschiedlicher elektrischer Ladung versorgen.

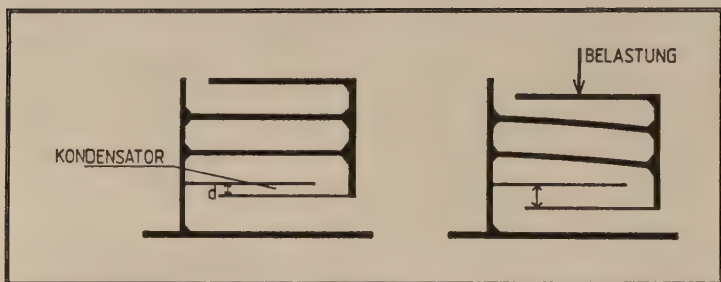


Abb. 3.3 : Querschnitt durch den Wägearm

Das Funktionsprinzip dieser Digitalwaage, die im weiteren als *S e n s o r* des Schlauchwaagensystems bezeichnet wird, besteht darin, daß durch Belastung der Parallelführung - des Wägebalkens - eine Abstandsänderung der beiden Kondensatorplatten verursacht wird. Dieser Kondensator ist aber als Meßwertaufnehmer Bauteil einer astabilen Kippschaltung mit Integrationsverstärker und Komparator. Solche Schaltungen zeichnen sich dadurch aus, daß sie ein sich dauernd änderndes, binäres Ausgangssignal erzeugen und durch die zyklische Füllung und Leerung eines Speichers, des Kondensators, eine

Folge von Rechtecksignalen liefern (Abb. 3.4).

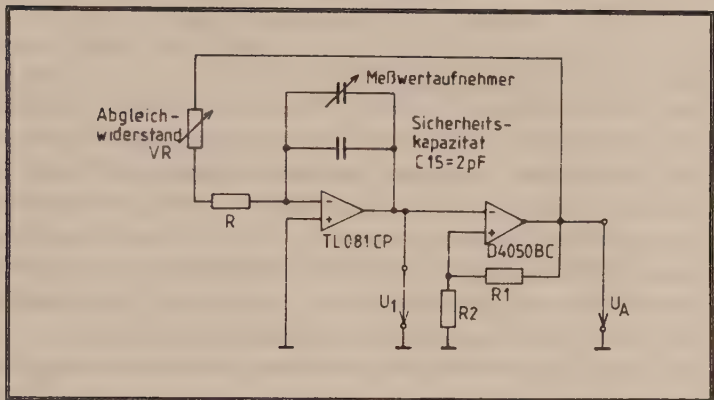


Abb. 3.4 : Prinzipschaltung der Frequenzerzeugung bei der KRUPS Additronic

Die frequenzbestimmenden Bauteile dieses Oszillators sind ein Widerstand R und eine Kapazität C /TJETZE, SCHENK 1986/. Wird eine der beiden Größen konstant gehalten, kann die andere als Meßwertaufnehmer digital meßbare Periodendauern darstellen. Bei der KRUPS Additronic dient der Plattenkondensator als Meßwertaufnehmer, dessen Kapazität C sich errechnet nach

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (3.1)$$

mit ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes,
 $= 8.859 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} / (\text{V} \cdot \text{m})$

ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante des Mediums zwischen den Platten des Kondensators, im vorliegenden Fall ≈ 1.0005 , da es sich um Luft handelt,

A = Fläche der Kondensatorplatten in m^2 und

d = Abstand der Kondensatorplatten in m.

Bei einer Plattenfläche A von ca. $6.5 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ und einem Plattenabstand von ca. 2 mm ergibt sich zusammen mit den Kabelkapazitäten eine theoretische Kapazität von ca. 50 pF , ein Wert, der durch Messungen bestätigt werden konnte. Die Kapazität C ist zusammen mit einer Sicherheitskapazität von 2 pF in den Gegenkopplungszweig geschaltet und bestimmt so das Zeitverhalten des Operationsverstärkers TL081CP von Texas Instruments, der eine außergewöhnliche Anstiegsgeschwindigkeit von $13 \text{ V}/\mu\text{s}$ aufweist. Da er im Sensor als Integrationsverstärker geschaltet ist, erfährt das Signal U_1 zwar eine Phasendrehung von 180° , was aber bei der Frequenzmessung nicht stört. Dieses Ausgangssignal liegt an einem Komparatoreingang an, der dem Bufferbaustein D4050BC der Firma NEC entnommen ist. Das Ausgangssignal U_A ist dann rechteckförmig und alterniert mit /SCHRÜFER 1984/ mit einer Frequenz f von :

$$f = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{1}{(R + VR) \cdot C} \quad (3.2)$$

Mit $R_1 \ll R_2$ und $R + VR \approx 500 \text{ k}\Omega$ ergibt sich für den Sensor ohne Belastung ein Wert von $f \approx 8\text{--}9 \text{ kHz}$. Kleinere Abweichungen vom theoretisch exakt ermittelten Wert beruhen unter anderem auf einem Mangel an Homogenität des magnetischen Feldes zwischen den Kondensatorplatten.

Setzt man Gl. (3.1) in Gl. (3.2) ein, so ergibt sich eine direktproportionale Abhängigkeit der Frequenz vom Abstand d der Kondensatorplatten und eine reziproke Abhängigkeit von ihrer Fläche A . Mit dem Abgleichwiderstand VR kann die Frequenz dann noch auf einen Sollwert

hingetrimmt werden.

Im Anzeigeteil des Waageninneren befindet sich eine Platine, die mit elektronischen Bausteinen

- zur Versorgung der oben beschriebenen Kippschaltung,
- zur Linearisierung der wegen der Zusatzkapazität nicht exakt linearen Beziehung zwischen Plattenabstandsänderung und Frequenz,
- zur partiellen Kompensation des Einflusses von Temperaturänderungen und

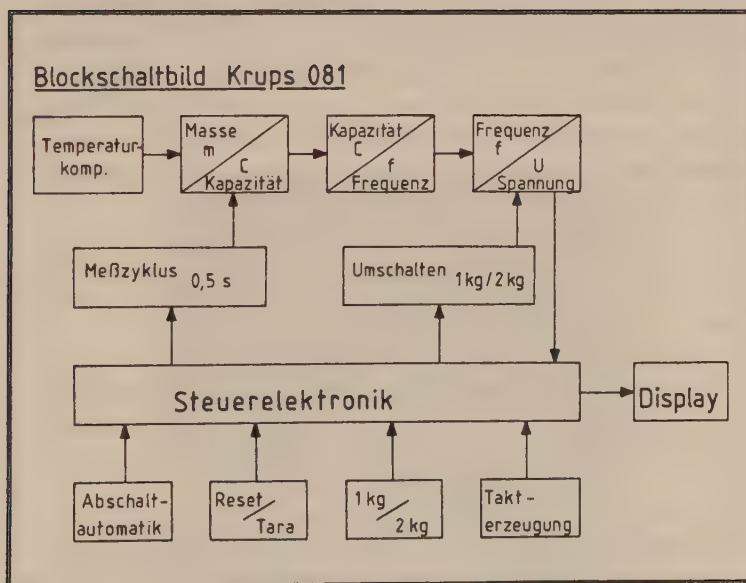


Abb. 3.5 : Blockschaltbild des Sensors

- zur Umsetzung der Frequenzen aus der astabilen Kippschaltung in eine Spannung für die ebenfalls auf der Platine befindliche vierstellige Digitalanzeige

bestückt ist. Auf der Platine konnte ein 3-Pin-Stecker identifiziert werden, der zu Kalibrierzwecken beim Zusammenbau des Sensors dient und an dem die mit der Belastung variierende Frequenz abgegriffen werden kann.

Der Sensor arbeitet normalerweise batteriebetrieben und hat aus diesem Grunde zur Vermeidung unnötigen Batterieverbrauchs eine Abschaltautomatik, die den Sensor nach zweiminütiger, unveränderter Anzeige des Meßwertes in der Digitalanzeige abschaltet. Als weiterer Baustein ist noch eine offensichtlich namensgebende Nullungstaste im Anzeigeteil vorhanden, die es ermöglicht, die Differenz zwischen einer Ausgangsbelastung und einer Belastung nach Hinzufügen weiterer Wägematerialien anzuzeigen.

Vor dem Einsatz dieser Waage als automatisch betriebener Sensor eines Schlauchwaagensystem sind deshalb noch folgende Veränderungen vorzunehmen :

- a) die Abschaltautomatik muß durch Überbrücken der betreffenden Anschlüsse außer Betrieb gesetzt werden und
- b) an der Außenwand der Waage muß seitlich eine Bohrung angebracht werden zur Aufnahme einer BNC-Buchse, die im Gehäuseinneren mit dem 3-Pin-Stecker zu verbinden ist, an dem die Frequenzinformation in Form eines Rechtecksignals anliegt.

3.2. GEFÄSSE, MESSFLÜSSIGKEIT UND VERBINDUNGSSCHLAUCH

3.2.1. Beschreibung der Einzelteile

Als Gefäße zur Aufnahme der Meßflüssigkeit wurden zunächst Laborgläser aus DURAN ausgesucht, die von ihrer Höhe (ca. 20 cm), ihrem Durchmesser (ca. 14 cm) und ihrem Gewicht (ca. 500 g) zum Sensor passen (Abb. 3.6). Diese Gläser wurden von der Glasbläserei der Ruhruniversität mit Ausflußoliven ausgestattet, die systembedingt seitlich angebracht werden müssen. Diese Maßnahme bietet zwar den Vorteil, die Verbindungsschläuche möglichst horizontal verlegen zu können, um die Einflüsse temperaturbedingter Dichteschwankungen der in ihnen befindlichen Meßflüssigkeit auszuschalten, vermindert auf der anderen Seite aber leider auch den Meßbereich um etwa 2 cm.



Abb. 3.6 : Sensor mit Gefäß

Die Oliven gestatten ein problemloses Anschließen von

Schläuchen mit dem entsprechenden Durchmesser. Als Meßflüssigkeit wird destilliertes Wasser mit einem geringen Zusatz von Netzungsmitteln und Kupfersulfat verwendet, um das bei anfänglichen Versuchen im Labor festgestellte Veralgeln zu verhindern.

Als Verbindungsschlauch wird normaler, durchsichtiger Plastikschauch mit ca. 1 cm Durchmesser verwendet, der an den Aufstellpunkten der Sensoren mit T-Stücken ausgestattet wird, von deren freiem Ende dann allerdings ein weicher Gummischlauch zum Sensor geführt wird, um

- flexibler zu sein bei der örtlichen Führung zum Gefäß und
- weitgehend einen die Gewichtsmessung beeinflussenden Kraftschluß zwischen Verbindungsschlauch und Gefäß auszuschließen.

In die Verbindungsstücke zu den Gefäßen sind Absperrhähne eingebaut, die für die Füllung der Schlauchwaage mit Meßflüssigkeit benötigt werden (Kap. 3.4.).

3.2.2. Auflösung als Funktion der Gefäßgröße

Im Gegensatz zu allen Schlauchwaagensystemen, die die Flüssigkeitsoberfläche antasten, spielt bei den gewichtsmessenden Systemen die Gefäßgröße eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Auflösung, da bei gleichbleibender Gewichtsmeßgenauigkeit die Auflösung proportional zur Grundfläche des Gefäßes wächst. Bei einem zylindrischen Gefäß mit Radius $R[\text{cm}]$ ergibt sich das Gewicht der Meßflüssigkeit im Zylinder zu

$$G[g] = \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g_w \quad (3.3)$$

mit der Wasserstandshöhe $h[\text{cm}]$ und dem spezifischen

Gewicht g_w von Wasser. Daraus kann die Auflösung der Höhenänderung dh aus der Gewichtsmeßgenauigkeit dG differentiell abgeleitet werden zu

$$dh[\text{cm}] = \frac{dG[\text{g}]}{\pi \cdot R^2 \cdot g_w} . \quad (3.4)$$

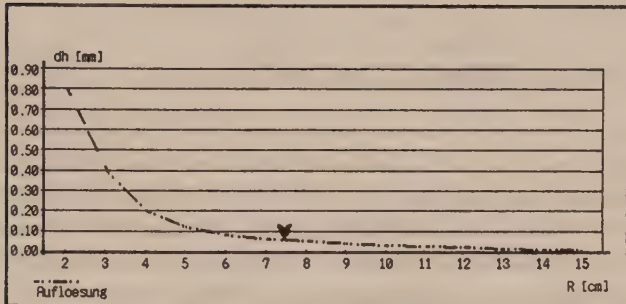


Abb. 3.7 : Abhängigkeit der Auflösung dh vom Radius R eines zylindrischen Gefäßes

Mit $dG = \pm 1 \text{ g}$ (Kap. 4.1.3.) ergibt sich die in Abb. 3.7 wiedergegebene Abhängigkeit, aus der sich für das System eine Auflösung von $dh \approx \pm 0.06 \text{ mm}$ ableitet.

3.2.3. Meßbereich als Funktion der Gefäßgröße

Im Gegensatz zur Auflösung sinkt bei gleichbleibendem Meßbereichsendwert des Sensors und größer werdendem Gefäßradius der für die Höhenmessung verfügbare maximale Wasserstand $h[\text{cm}]$, was einer Verkleinerung des Meßbereichs entspricht. Für einen Glaszylinder mit der Wandstärke $d = 0.17 \text{ cm}$ ergibt sich bei einem spezifischen Gewicht $g_{gl} = 2.5$ für Glas folgende Beziehung für das zu messende Gewicht $G[\text{g}]$ auf der Waage :

$$G[g] = G(\text{Glas}) + G(\text{Wasser})$$

mit $G(\text{Glas}) = (\pi \cdot R^2 + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h) \cdot d \cdot g_{\text{Gl}}$ und

$$G(\text{Wasser}) = \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g_w .$$

Daraus leitet sich für den Meßbereich $h[\text{cm}]$ die Beziehung ab :

$$h = \frac{2.000 \text{ g} - \pi \cdot R^2 \cdot d \cdot g_{\text{Gl}}}{2\pi \cdot R \cdot d \cdot g_{\text{Gl}} + \pi \cdot R^2 \cdot g_w} \quad (3.5)$$

Abb. 3.8 gibt diese Funktion graphisch wieder und enthält ebenso wie Abb. 3.7 die Position der in Kap. 3.2.1 beschriebenen Gefäße, die sich als brauchbarer Kompromiß zwischen der Forderung nach möglichst hoher Auflösung und möglichst großem Meßbereich erwiesen hat. Danach beträgt der Meßbereich ca. 10 cm.

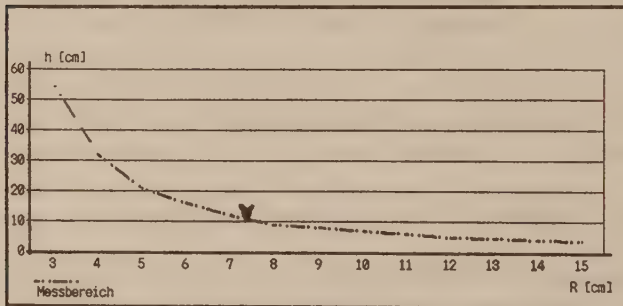


Abb. 3.8 : Meßbereich h als Funktion des Gefäßradius R

3.3. DATENERFASSUNG

3.3.1. Der Tischrechner Commodore C64

Die "Low-Cost"-Zielsetzung für das ganze System ließ sich sehr gut vereinbaren mit den Erfahrungen, die im Umgang mit dem Kleinrechner Commodore C64

- bei der Erstellung von Vermessungsprogrammen und
- bei der Erfassung und Weiterverarbeitung von Meßwerten im Labor

gewonnen worden waren. Hinzu kommt, daß durch die enorme Verbreitung dieses Gerätes ein großer Markt für Zubehörteile entstanden ist, die dieses Gerät als Digitalvoltmeter, Oszilloskop, Analog-Digitalwandler etc. einzusetzen gestatten. Die anerkannte Leistungsfähigkeit erweist sich z.B. in der Verwendung dieses Rechners bei industriellen Meßwerterfassungsanlagen (z.B. als modularer Mess- und Steuerrechner ARCUS der Firma Dr. Kolla-Meß- und Regelungstechnik, Bochum), die man für die vorliegende Aufgabe unter Umständen hätte einsetzen können, wobei allerdings neben der erforderlich werdenden Anpassung der "Low-Cost"-Aspekt etwas in den Hintergrund gedrängt worden wäre.

Der Rechner kann mit einer umfangreichen Peripherie verbunden werden, von der für die vorliegende Aufgabe

- eine Floppy-disk 1541 (170-kByte-Laufwerk) zur Speicherung der Programme und Meßwertdateien und
- ein Punktnadeldrucker MPS 801 zur zusätzlichen Protokollierung der gemessenen Werte

eingesetzt wurden. Für den Kontakt mit der Peripherie besitzt der Rechner den User-Port, eine frei program-

mierbare 8-bit-Parallelschnittstelle in Gestalt eines 24-poligen Verbindungssteckers, über den sowohl

- digitale Signale als Informationen v o n außen empfangen als auch
- Signale zur Betätigung externer Schalter n a c h außen abgegeben

werden können. Der 38 kByte große, für BASIC-Programme verfügbare Kernspeicher hat sich für die notwendige Systemsoftware als völlig ausreichend erwiesen, so daß mit diesem System und seinen Gesamtkosten von weniger als 1.500 DM für den Rechner mit Monitor, Floppy-disk und Drucker ein ausgezeichnetes Preis-Leistungsverhältnis für die zu lösende Aufgabe erzielt wird.

3.3.2. Der Frequenzzählerbaustein

In der Sekundärliteratur zum Commodore C64, die mangels erschöpfender Bedienungsanleitungen und dank der Verbreitung des Gerätes einen ziemlichen Umfang angenommen hat, gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen, die sich über die Verwendung des Gerätes als Rechner hinaus mit den Möglichkeiten seiner technischen Anwendung beschäftigen / BRÜCKMANN 1984, ANDERSSON, KULLBJER 1984 /. Für die Schlauchwaage von Belang ist dabei eine kleine Zusatzplatine aus / BRÜCKMANN 1984 /, die mit 4 integrierten Bausteinen die Messung von Frequenzen bis zu 30 MHz ermöglicht, wobei die Spannung der gemessenen Impulse nicht wesentlich höher als 5 Volt liegen darf, eine Einschränkung, die von den gewählten Sensoren erfüllt wird. Dieser Baustein mit Materialkosten von ca. 15,- DM nutzt die Fähigkeit des C64, mit seinem Count-Eingang Impulse zu zählen, wobei die Zählung von den Timer-Bausteinen des Systems übernommen wird. / BRÜCK-

MANN 1984 / gibt an gleicher Stelle eine in Maschinensprache geschriebene Routine an, die in jedes BASIC-Programm eingebunden werden kann, mit dem eine solche Frequenzzählung durchgeführt werden soll.

3.3.3. Sonstige Hardware

Da die Schlauchwaage als Vielstellenmeßeinrichtung geplant war, mit der es möglich sein sollte, wenigstens 20 Meßstellen zu betreiben, war es erforderlich, für den Userport eine Erweiterung zu beschaffen, die die Anzahl seiner frei programmierbaren Ein- und Ausgänge erheblich vergrößerte, da für jeden Sensor jeweils ein Ausgang als Steuerleitung für die Anschaltung der Meßwertabfrage vorgehalten werden muß. Diese Erweiterung wurde im "Multi-Board 84" der Firma BOCKSTALLER gefunden, die neben einer Erweiterung des User-Port um 10 Ports zu je 8 Bit und 20 Steuerleitungen noch zusätzliche Bausteine wie 2 Analog-Digital-Wandler und 2 Digital-Analog-Wandler anbietet, die unter Umständen für Temperaturmessungen etc. genutzt werden können. Das "Multi-Board 84" wird in eine weitere Schnittstelle des Commodore C64, den "Expansion-Port" adaptiert und läßt somit den eigentlichen User-Port für den Frequenzzählerbaustein frei. Der Preis dieser Erweiterung liegt bei ca. 1.000,- DM, kostengünstigere Bausteine sind mittlerweile auf dem Markt.

Da die Frequenzen der Sensoren unter Umständen über 100 und mehr Meter abgefragt werden müssen, wurde ein Niederfrequenzvorverstärker vor den Frequenzzählerbaustein eingebaut, mit dem die Signale der Sensoren um 10 db verstärkt werden. Versuche ergaben mit diesem Zusatz problemlose Frequenzabfragen bis zu 200 m Entfernung.

Zur Umschaltung zwischen den einzelnen Kanälen wird pro Kanal ein vom Rechner programmgesteuert schaltbares Relais benötigt, das die Frequenz des anzusteuernenden Sensors zum Frequenzzähler leitet.

Zum Betrieb der gesamten Anlage (Abb. 3.9) ist neben der 220-V-Netzspannung eine 6-Volt- und 20-Volt-Gleichspannungsquelle erforderlich, die Relais und Sensoren bzw. Nf-Verstärker, User-Port-Erweiterung und Lüfter für die in einer gemeinsamen Box untergebrachte Zusatzelektronik mit Spannung versorgt und das System mit Kosten von ca. 100,- DM abrundet.



Abb. 3.9 : Hardware des neu entwickelten Systems

In Abb. 3.10 ist die Schaltung der gesamten Anlage als Blockschaltbild wiedergegeben. Dabei sind als weitere Module noch eine Uhr mit Datum zur Erleichterung der zeitlichen Zuordnung gespeicherter Meßwerte vorgesehen sowie ein Autostart-Modul, das nach einem Stromausfall für ein selbständiges Neuaufstarten des Systems sorgen soll.

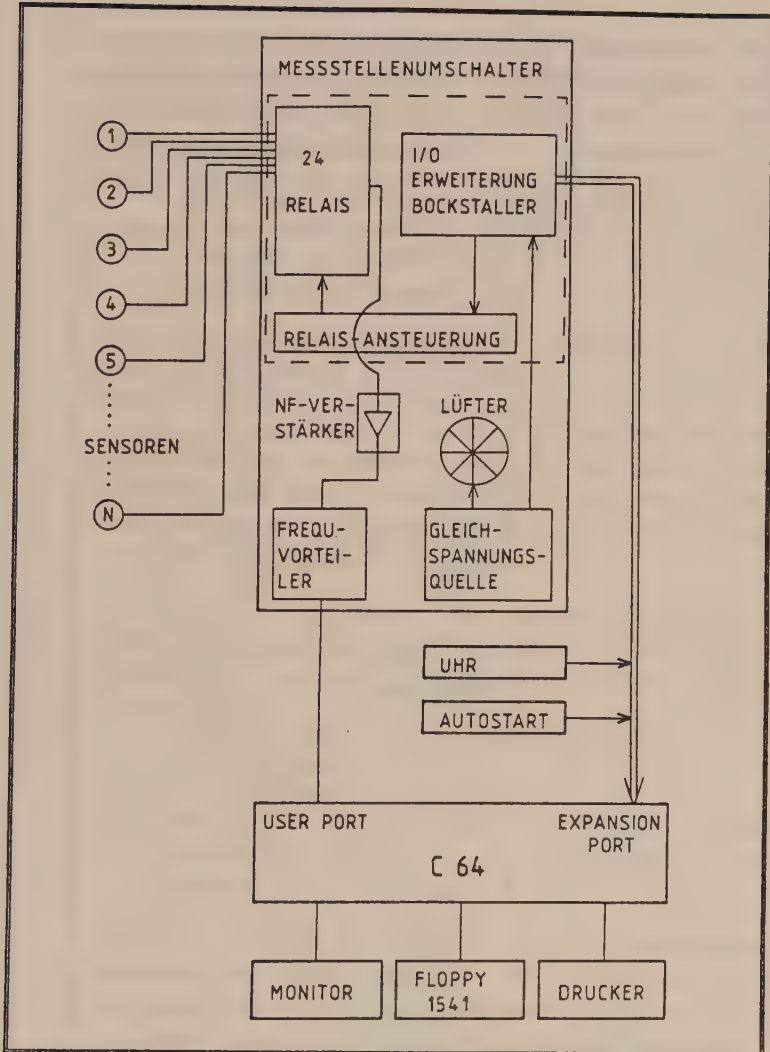


Abb. 3.10 : Blockschaltbild des Systems

3.3.4. Systemsoftware

Da mit der Anlage nach den anfangs genannten Zielsetzungen keine zeitkritischen Vorgänge beobachtet werden sollen, eine Aufgabe, für die eine Schlauchwaage mit einer Eigenfrequenz $\ll 1$ Hz denkbar ungeeignet wäre, konnte die System-Software in BASIC geschrieben werden.

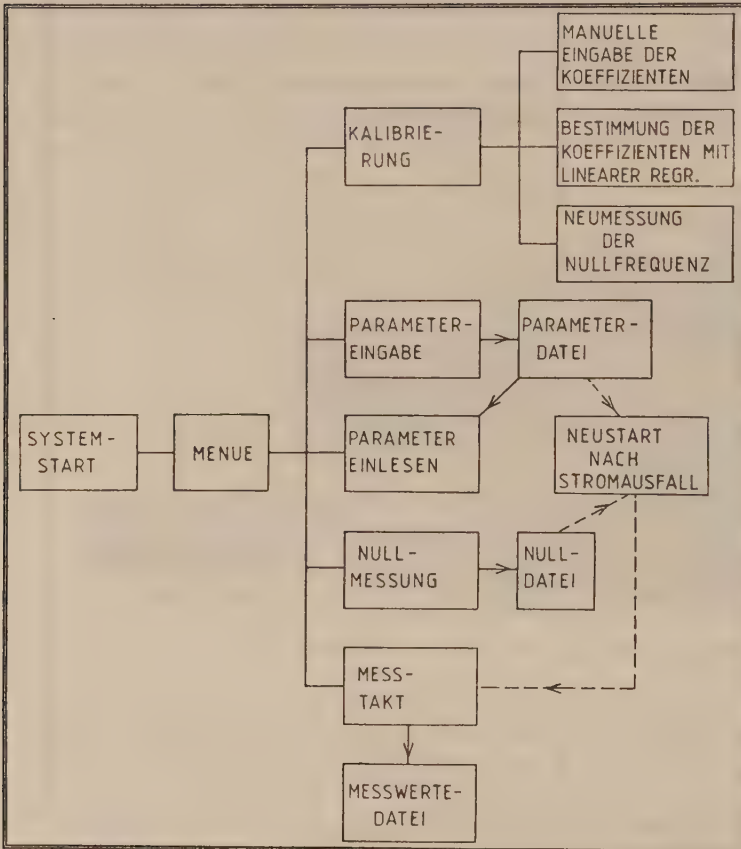


Abb. 3.11 : Gliederung und Verknüpfung der Systemsoftware

Die Software ist aus Gründen des Überblicks bei der Pflege in einzelne Module aufgeteilt, deren gegenseitige Verbindung aus Abb. 3.11 hervorgeht.

Nach dem Systemstart, bei dem

- die Felder für die Systemparameter dimensioniert,
- die Maschinensprache-Routine für die Frequenzmessung ins RAM "gepoked" und
- die Kanäle des Meßstellenumschalters in die Ausgangsstellung gebracht werden,

zeigt sich dem Benutzer ein Menue, von dem aus die einzelnen Module angewählt werden. Dabei muß bei der Initialisierung eines neuen Projektes nach einer bestimmten Reihenfolge vorgegangen werden, deren Einhaltung vom Programm überwacht wird.

Zunächst ist das Modul "Kalibrieren" aufzurufen, mit dem die Sensorparameter, die die Beziehung zwischen Frequenz und Belastung festlegen,

- entweder über eine lineare Regression mit Sollgewichten bestimmt
- oder, was bei der relativ guten Konstanz dieser Parameter der Normalfall ist, manuell eingegeben werden.

Für die Kalibrierung während eines Meßprojektes von mehrwöchiger Dauer ist noch ein weiteres Modul implementiert, mit dem die Nullfrequenzen nachgemessen und im Auswertealgorithmus ersetzt werden können.

Danach kann der Programmbaustein "Parametereingabe" aufgerufen werden zwecks möglicher Eingabe zusätzlicher

Steuerparameter wie

- Anzahl und X-Y-Koordinaten der Meßstellen,
- X-Y-Koordinaten der Umringsgrenzen des zu beobachtenden Bauwerkes sowie
- Anzahl und Frequenz von Messung und Registrierung.

Diese Parameter werden zusammen mit den Sensorkonstanten in die Parameterdatei abgelegt, von der sie nach einem Ausfall des Systems mit dem Programmbaustein "Parameter Einlesen" wieder nachgeladen werden können. Zu diesen Parametern kommen noch die Gefäßkennwerte hinzu, die für jedes Gefäß individuell den Zusammenhang zwischen Gewicht und Niveau der Meßflüssigkeit unveränderlich festlegen.

Nach diesen Vorarbeiten kann die "Nullmessung" aufgerufen werden, mit der

- das System nach Einfüllen der Meßflüssigkeit auf seine Stabilität innerhalb der relevanten Grenzen untersucht und
- ein Ausgangszustand festgehalten werden kann, der in die "Nulldatei" weggespeichert wird, die wie die "Parameterdatei" jederzeit wieder eingelesen werden kann.

Der "Meßtakt" ist dann das Modul des Programmpaketes, das den weiteren Verlauf der Messungen des Schlauchwaagensystems steuert. Mit diesem Baustein

- werden die Frequenzen der Sensoren nach dem in der "Parameterdatei" festgelegten zeitlichen Rhythmus abgefragt,

- werden die Meßwerte mit den Systemparametern in Flüssigkeitsniveaus und Punkthöhenänderungen umgerechnet,
- wird die Abstimmung der gewogenen Gesamtmenge der Meßflüssigkeit unter Beachtung von Plausibilitätsprüfungen zur Elimination der in Kap. 2. genannten Fehlereinflüsse vorgenommen,
- werden die gegenüber der Nullmessung festgestellten Änderungen in den auf dem Monitor des Systems dargestellten Grundriß des Bauwerkes so weit wie möglich maßstabsgetreu eingetragen,
- erfolgt die Registrierung der Meßwerte zusammen mit der Zeit in der Meßwertedatei mit zusätzlicher Protokollierung auf einem Drucker.

Über eine Abfrage des Tastaturpuffers kann der "Meßtakt" jeweils nach einem Meß- und Registrierzyklus unterbrochen werden, um zum "Menue" zurückzukehren und z.B. eine Neukalibrierung der Nullfrequenz vorzunehmen.

Die mögliche Anzahl der ohne Diskettenwechsel zu registrierenden Datensätze richtet sich nach den 170 kB der eingesetzten Floppy-Disc und bestimmt über den Registrierzyklus die Zeit bis zum Diskettenwechsel.

Um den Datenfluß von der Registrierung bis zur endgültigen, graphischen Darstellung der Höhenänderungen zu vervollständigen, wurden zwei Anwendungsprogramme geschrieben, mit denen die Meßwertedatei vom Commodore C64 zu einem IBM-kompatiblen Personal Computer übertragen wird. Ein weiteres Programm wurde entwickelt, das mit Hilfe eines Plotters HP 7475A die graphische Auswertung der Schlauchwaagenmessung ermöglicht.

3.4. INBETRIEBNAHME DES SYSTEMS

Für die Füllung des Systems hat sich das folgende Vorgehen als effektiv erwiesen (Abb. 3.12) :

Die Meßflüssigkeit wird mit einer kleinen Pumpe, betrieben mit einer Bohrmaschine, aus einem Vorratsbehälter in die Gefäße gedrückt, wobei mit Absperrhähnen zunächst nur der Weg zum ersten Gefäß geöffnet wird. So-

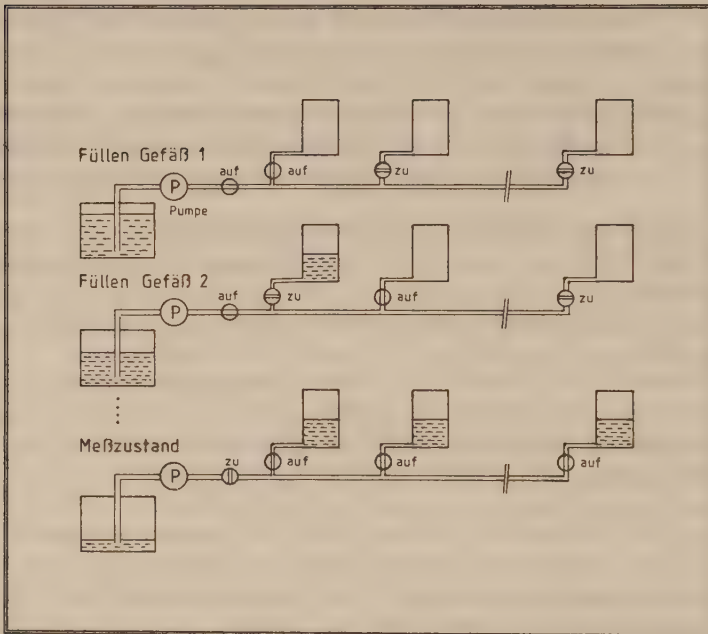


Abb. 3.12 : Abfolge des Füllvorgangs

bald die Meßflüssigkeit sich ohne Luftblasen in das Gefäß ergießt, wird der zugehörige Absperrhahn geschlossen und der Vorgang mit dem nächsten Gefäß wiederholt.

Nachdem auf diese Weise alle Gefäße gefüllt sind, werden der Absperrhahn hinter der Pumpe geschlossen und alle Absperrhähne zu den Gefäßen geöffnet.

Vor der Füllung ist es erforderlich, sich per Nivellement einen schnellen Überblick über die Höhen der Aufstellpunkte zu verschaffen, um daraus für die einzelnen Gefäße das ungefähre Niveau im Gefäß auszurechnen, auf das sich die Meßflüssigkeit einspielen wird. Sobald dieses Niveau beim Füllvorgang erreicht ist, wird der entsprechende Absperrhahn geschlossen und die Füllung des nächsten Gefäßes begonnen. Am Rechner kann dann die erste Nullmessung gestartet werden, die solange wiederholt wird, bis sich das System stabilisiert hat. Bei einer Gesamtlänge des Systems von ca. 100 m kann dann spätestens nach 15 min die Nullmessung abgespeichert werden, die die Bezugswerte liefert für den danach zu startenden Meßtakt.

4. UNTERSUCHUNG UND KALIBRIERUNG DES SYSTEMS

Der Sensor ist als elektronische Waage einer Reihe von Einfluß- und Störgrößen ausgesetzt, die sich nach /KOCHSIEK 1984/, wie in Abb. 4.1 wiedergegeben, klassifizieren lassen.

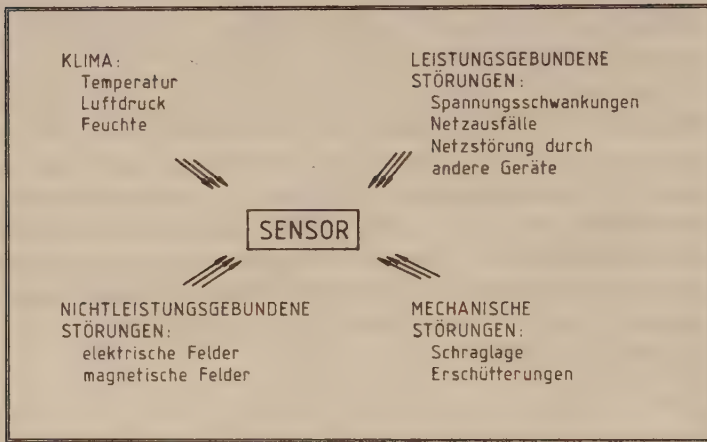


Abb. 4.1 : Der Sensor im Umfeld

Da es unmöglich ist, jede Einfluß- und Störgröße im Detail umfassend zu untersuchen, kann die Eignung des Sensors für die geplante Aufgabenstellung nur aufgrund einer Kombination von exemplarischen Labortests, theoretisch abgeleiteten Reaktionsmustern und praktischen Meßeinsätzen beurteilt werden.

Die Kalibrierung des Systems im Sinne von /DIN 1319/ soll unter vergleichsweise ungestörten Verhältnissen den funktionalen Zusammenhang

- a) zwischen Belastung als Eingangssignal und Frequenz als Ausgangssignal am Einzelsensor und

- b) zwischen der Höhenänderung der Sensoren und dem am Rechner registrierten Wert bei einer Messung mit dem komplett installierten System

ergeben einschließlich einer Abschätzung der dabei erzielbaren Genauigkeiten.

4.1. DER SENSOR

4.1.1. Reproduzierbarkeit des Ausgangssignals

Die Genauigkeit der Frequenz des Sensors kann durch Wiederholungsmessungen abgeleitet werden. Zu diesem Zweck wurde der Sensor im Abstand von 10 sec mehrfach mit einem Gewicht be- und wieder entlastet. Die Meßreihen aus Tab. 4.1 zeigen typische Streuungen, die sich bei solchen Untersuchungen ergeben. Die aus den Meß-

Nr.	Belastung 100 g	1.000 g	2.000 g
1	9710.1 Hz	11511.3 Hz	13511.2 Hz
2	9710.5 "	11511.1 "	13510.3 "
3	9709.8 "	11511.5 "	13511.8 "
4	9709.7 "	11511.6 "	13509.5 "
5	9710.0 "	11512.1 "	13510.2 "
6	9709.9 "	11512.1 "	13511.2 "
7	9710.2 "	11512.6 "	13511.7 "
8	9711.6 "	11511.6 "	13510.5 "
9	9711.4 "	11512.1 "	13510.7 "
10	9711.3 "	11510.9 "	13510.7 "
	X = 9710.45 Hz	11511.69 Hz	13510.78 Hz
	$\sigma = \pm 0.7$ Hz	± 0.5 Hz	± 0.7 Hz

Tab 4.1: Typische Streuungen bei Wiederholungsmessungen

reihen abgeleiteten Standardabweichungen können als "innere Genauigkeit" /WOLF 1968/ des Sensors angesehen werden, die ein Maß für die Güte der Frequenzerzeugung

einschließlich der mechanischen Umsetzung mit der Parallelführung darstellt und für die sich auch aus weiteren Meßreihen *keine* Belastungsabhängigkeit ergab. Die Messung der Frequenz erfolgte mit dem in Kap. 4.3. beschriebenen Laborfrequenzzähler Philips PM 6622. Eine weitergehende Aufspaltung dieses Wertes analog zu dem in /WITTE 1986/ beschriebenen Vorgehen bei EDM-Geräten konnte mangels geeigneter Längenmeßtaster zur Beurteilung der Parallelführung nicht erfolgen und erübrigte sich auch angesichts der zweitrangigen Bedeutung der "inneren Genauigkeit" im Vergleich zur "äußeren Genauigkeit", die erst beim Einsatz des kompletten Systems unter dem Einfluß aller möglichen Störquellen ermittelt werden kann.

4.1.2. Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs zwischen der Belastung des Wägebalkens und der erzeugten Frequenz

Mit einem geeichten Gewichtssatz, der es gestattet, Gewichte zwischen 1 g und 2000 g mit einer kleinsten Abstufung von 1 g und einer Standardabweichung $< \pm 0.1$ g durch geeignete Kombination von Einzelgewichten zusammenzustellen, wurden die Sensoren auf ihre Frequenz-Belastungs-Funktion untersucht. Dabei ergaben Regressionsanalysen nach dem Ausgleichungsansatz

$$f[\text{Hz}] = f_0 + A_1 \cdot G + A_2 \cdot G^2 + A_3 \cdot G^3 + \dots \quad (4.1)$$

mit der gemessenen Frequenz $f[\text{Hz}]$, der Frequenz f_0 bei Nullbelastung und der Belastung $G[\text{g}]$, die von Null beginnend in 50-g-Abstufung bis zur Höchstbelastung gesteigert wurde, für fünf Sensoren folgende Ergebnisse :

Sensor	1	2	3	4	5
$f_0[\text{Hz}]$	8074.2	9195.8	9005.6	9237.6	7831.6
$\sigma(f_0)$	± 0.2	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
A_1	1.9622	2.0402	1.9614	1.9723	1.9814
$\sigma(A_1)$	± 0.0002	± 0.0002	± 0.0003	± 0.0003	± 0.0003
σ_0	± 0.8	± 0.7	± 0.8	± 0.9	± 0.7

Tab. 4.2 : Berechnung der Regressionskoeffizienten für die Gewicht-Frequenz-Relation

Die weiteren Koeffizienten A_1 , die bis zur 4. Ordnung berechnet wurden, ergaben sich nach dem Student-Test als von Null nicht signifikant abweichend und sind deshalb hier nicht aufgeführt. Die sich aus der Ausgleichs-

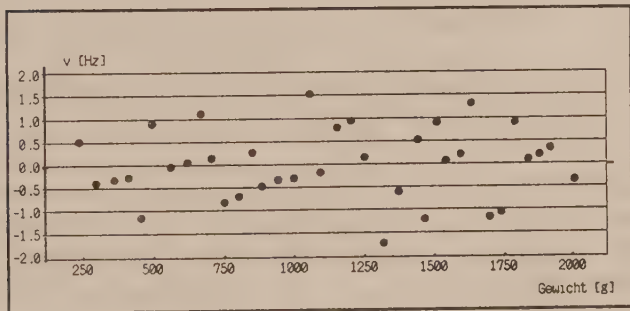


Abb. 4.2 : Residuen der Frequenz-Gewicht-Relation

chung ergebenden Residuen sind für Sensor 1 in Abb. 4.2 wiedergegeben und zeigen keine systematischen Auffälligkeiten mehr. Ihre Beträge liegen bei 0.6 Hz im Mittel, bestätigen den Gewichtseinheitsfehler σ_0 aus Ta-

belle 4.1 und lassen noch keine Genauigkeitsverminderung gegenüber der Reproduzierbarkeit aus Kap. 4.1.1. erkennen.

Da die Sensoren beim Schlauchwaageneinsatz mit einem Gefäß mit Flüssigkeitsinhalt belastet werden und hierbei die spezifische Dichte des Wägematerials (≈ 1.2) erheblich von der Dichte der Eichgewichte (≈ 7.8) abweicht, muß wegen der angestrebten Präzision der Massenbestimmung der Einfluß des Auftriebs in Luft abgeschätzt werden /KOCHSIEK 1984/. Er berechnet sich zu :

$$dG = G \cdot \frac{P_L/P_W}{(1 - P_L/P_W)} \cdot \left(1 - \frac{P_W}{P_N} \right) \quad (4.2)$$

mit dG = Einfluß des Auftriebs in g
 G = Gewicht von Gefäß und Meßflüssigkeit in g
 P_L = spezifische Dichte der Luft ($\approx 1.2 \text{ kg/m}^3$)
 P_W = spezifische Dichte der Gefäß-Flüssigkeit-Kombination ($\approx 1200 \text{ kg/m}^3$)
 P_N = spezifische Dichte der Kalibriergewichte ($\approx 7800 \text{ kg/m}^3$)

Bei Maximalbelastung mit Gefäß und ca. 1.5 l Messflüssigkeit ergibt sich ein auftriebsbedingter Gewichtsverlust von ca. 1.7 g, der bei Vernachlässigung zu einem systematischen Fehler von ca. 0.1 mm pro 10 cm gemessenen Höhenunterschied führen würde.

4.1.3. Bestimmung der Auflösung des Sensors

Mit den in Kap. 4.1.2. ermittelten Koeffizienten für die Frequenz-Gewicht-Relation läßt sich in Umkehrung des Ansatzes aus Gl. (4.1) aus einer gemessenen Frequenz auf die vorhandene Belastung $G[g]$ schließen.

$$G[g] = \frac{f[\text{Hz}] - f_0[\text{Hz}]}{A_1} \quad (4.3)$$

Die Genauigkeit des so ermittelten Gewichtes kann nach dem Fehlerfortpflanzungsansatz abgeschätzt werden zu

$$dG = - \frac{1}{A_1} df_0 + \frac{1}{A_1} df - \frac{G}{A_1} dA_1 \quad (4.4)$$

abschätzen. Neben den Standardabweichungen der Koeffizienten wirkt sich dabei auf die Gewichtsbestimmung noch die Unsicherheit der Frequenzmessung aus. Da diese nach Kap. 4.3. mit $df < \pm 1$ Hz anzusetzen ist, errechnet sich für dG unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages für eventuelle Korrelationen ein zu erwartender Wert von ca. ± 1 g. Dieser Wert steht in Übereinstimmung mit den Angaben der Firma KRUPS zu ihrem Produkt und kann deshalb für die weiteren Überlegungen zugrundegelegt werden.

4.1.4. Drift des Ausgangssignals

Die Nullfrequenzen von fünf Sensoren wurden über den Zeitraum eines Jahres beobachtet. Dabei ergaben sich folgende Frequenzänderungen $df[\text{Hz}]$:

Sensor	1	2	3	4	5
$df[\text{Hz}]$	+ 30	+ 50	+ 25	+ 33	+ 50

Tab. 4.3 : Frequenzdrift in einem Jahr

Daraus leitet sich eine ziemlich einheitliche Tendenz von ca. 3 Hz/Monat ab. Von Bedeutung für die Messungen sind dabei aber nur die individuell verschiedenen Anteile, da die für alle Sensoren einheitlichen Tendenzen durch die Auswertalgorithmen aufgefangen werden. Die

individuellen Anteile verursachen eine Unsicherheit von ca. 0.03 mm/Monat und machen daher eine Überprüfung der Nullfrequenzen in regelmäßigem Abstand erforderlich, eine Maßnahme, die mit einem Programm-Modul des Software-Paketes dadurch berücksichtigt werden kann, indem alle Gefäße einzeln kurz angehoben werden. Eine Veränderung des Maßstabes (d.h. des linearen Koeffizienten A_1 aus Kap. 4.1.2.) konnte nicht festgestellt werden, so daß dessen Neukalibrierung während einer laufenden Meßperiode nicht erforderlich ist.

In einem kürzeren Zeitraum von 3 Wochen wurden die Frequenzen täglich zweimal erfaßt und in Abb. 4.3. dargestellt. Die Temperatur war konstant, der Luftdruck variierte zwischen 1000 und 960 mbar. Daraus leitet sich eine Stabilität ab, die nach Kap. 4.1.2. einen maximalen Fehler der gemessenen Höhenunterschiede von ca. 0.2 mm bedingt (aus 6 Hz Differenz zwischen den Sensoren 2 und 5 nach 3 Tagen). Die aus wahren Fehlern berechenbare Standardabweichung für eine Höhenangabe, berechnet aus allen Abweichungen, liegt bei ± 0.1 mm.

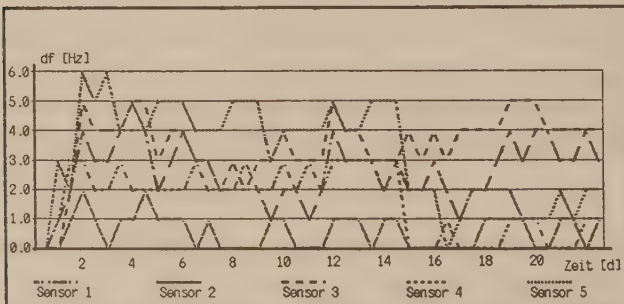


Abb. 4.3 : Frequenzgang im Zeitraum von 3 Wochen

4.1.5. Niveauänderung der Aufsetzfläche bei Belastung

Aus der Konstruktionsbeschreibung in Kap. 3.1. ergibt sich für mit Gewichtsmessung arbeitende Schlauchwaagensysteme die Besonderheit, daß der Sensor die Bewegung des Aufstellpunktes dadurch scheinbar übersetzt, daß sich das Niveau der Aufsetzfläche bei größer werdender Belastung nach unten verändert und umgekehrt. Dieser Einfluß wurde mit einem Meßtaster MT 30 der Fa. Heidenhain bestimmt (Abb. 4.4). Eine Regressionsanalyse ergab eine lineare Abhängigkeit von $- 0.63 \pm 0.03 \text{ mm/kg}$. Nichtlineare Koeffizienten sind weit unter der Signifikanzschwelle angesiedelt, die Residuen sind in Abb. 4.5 aufgetragen.

Die Linearität der Beziehung zwischen Belastung und Tellerabsenkung folgert aus der Linearität zwischen Frequenz und Belastung nach Kap. 4.1.2. und der Linearität zwischen Frequenzänderung und Änderung des Abstandes der Kondensatorplatten nach Gl. (3.2).

$$df = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{1}{R \cdot e_0 \cdot e_x \cdot A} \cdot dd \quad (4.5)$$

Mit den in Kap. 3.1. angegebenen Parametern des Sensors bestätigt sich hiernach der gemessene Frequenzgradient von ca. 2 kHz pro 1 kg Belastung.

Da der Meßtaster mit einer Federkraft von ca. 0.5 N arbeitet, mußte dieser Einfluß bei der Beziehung Belastung-Absenkung berücksichtigt werden. Er verfälscht alle Absenkungen gleichmäßig um ca 0.03 mm.

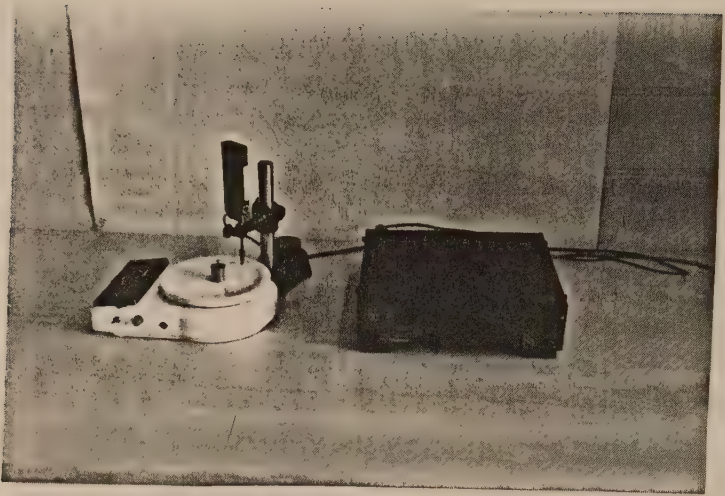


Abb. 4.4 : Versuchsaufbau zur Bestimmung der Aufsetzflächenveränderung

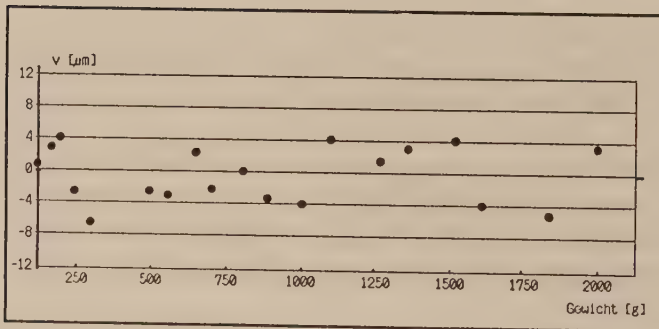


Abb. 4.5 : Residuen der Belastungs-Senkungs-Relation

Der Meßtaster weist nach Firmenangabe eine Meßgenauigkeit von $\pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ auf. Dieser Wert konnte durch Vergleichsmessungen mit dem Laserinterferometer Model 7920 RCD LASERGAGE SYSTEM I der Firma Mark-Tech-Inc., das im Labor des Institutes für Vermessungswesen zur Durchführung von Instrumentenprüfungen installiert wurde (Abb. 4.6), bestätigt werden und reicht völlig aus, um die Aufsetzflächenkorrektur und ihre Unsicherheit signifikant bestimmen zu können.

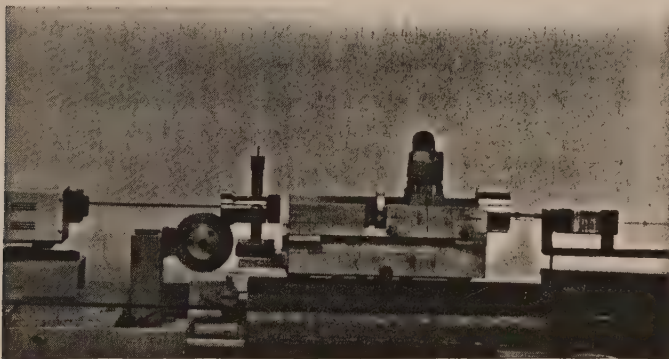


Abb. 4.6 : Vergleich Meßtaster MT 30 - Interferometer

Bei einem Radius der Gefäße von $\approx 7.2 \text{ cm}$ entspricht aber eine Wasserhöhe von ca. 6.14 cm gerade einem Gewicht von 1 kg , so daß alle aus Gewichten berechneten Höhenunterschiede durch

$$k = 1 + \frac{0.63}{61.4} = 1.0102 \quad (4.6)$$

dividiert werden müssen, um diesen Einfluß zu eliminieren. Nach einmaliger Iteration bleibt der Einfluß unter $0.1 \text{ } \text{‰}$, d. h. unter $0.1 \text{ mm}/100 \text{ mm}$ Höhenänderung.

Die Meßgenauigkeit des Tasters reicht jedoch nicht aus,

die in Kap. 4.1.2. bestimmte Güte der Linearität zwischen Belastung und Ausgangssignal zu bestätigen, da der Taster hierzu ca. 1.3 mm in ca. 4.000 Teile auflösen müßte. Die unter diesem Blickwinkel doch relativ großen Beträge der Residuen aus Abb. 4.5 erklären sich aus der Schwierigkeit, den Sensorteller mit den Kalibrierengewichten gleichmäßig zu belasten. Da die Frequenzen bei diesem Versuch ebenfalls gemessen wurden und sich die Linearität zwischen Frequenz und Belastung in gleicher Qualität wie bei Kap. 4.1.2. ergab, kann gefolgert werden, daß kleine Exzentrizitäten im Angriffspunkt der Belastung zwar Kipperscheinungen des Sensortellers verursachen können, auf das Ausgangssignal des Sensors jedoch ohne Einfluß sind. Dieses Ergebnis ist von Bedeutung für alle Messungen mit Kalibrierengewichten, nicht jedoch für die eigentliche Messung mit dem Schlauchwaagensystem, da hierbei die unterschiedlichen Belastungszustände nicht zu Verschiebungen des Angriffspunktes der Belastung führen.

4.1.6. Temperaturabhängigkeit des Sensors

Da der Sensor als wesentlichen Baustein seines frequenzerzeugenden Systems den in Kap. 3.1. skizzierten Kondensator besitzt, und da kapazitiv arbeitende Sensoren in der Meßtechnik als temperaturempfindlich bekannt sind, mußte der Temperaturuntersuchung besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Die vordergründig theoretisch zu erwartenden Einflüsse der Temperatur lassen sich ableiten aus den Gl. (3.1) und (3.2) über die Einflüsse der Temperatur auf die Geometrie des Meßumformers und auf die Dichte des Dielektrikums.

Bei einem Plattenabstand d von maximal 3 mm ergibt sich

eine Abstandsänderung dd von :

$$dd = 0.003 \cdot \alpha \cdot dt \quad (4.7)$$

mit $\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6}$ und

dt = Temperaturänderung in $^{\circ}\text{C}$.

Daraus resultiert mit Gl. (4.3) pro $^{\circ}\text{C}$ Temperaturerhöhung eine vernachlässigbare Veränderung des Meßsignals von ca. $+0.1$ Hz entsprechend $3 \mu\text{m}$ Höhenmeßfehler.

Außerdem vergrößert sich die Fläche A der Kondensatorplatten mit einer Temperaturerhöhung dt von $+1^{\circ}\text{C}$ um

$$dA = A \cdot \alpha_x \cdot dt \quad (4.8)$$

mit A = Plattenfläche $\approx 0.005 \text{ m}^2$ und

α_x = Flächenausdehnungskoeffizient
 $\approx 24 \cdot 10^{-6}$

Mit den Gleichungen (3.1) und (3.2) leitet sich daraus eine Verminderung des Meßsignals um ca. -0.2 Hz pro $^{\circ}\text{C}$ ab, die durch den Einfluß der Abstandsänderung zum Teil kompensiert wird und ebenfalls vernachlässigbar ist.

Schließlich ergibt sich der Einfluß der Temperatur auf das Dielektrikum nach /AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS HANDBOOK 1972/ aus der Funktion :

$$\frac{e - 1}{e_x - 1} = \frac{p}{p_0 \cdot (1 + 0.003411 \cdot (t - 20))} \quad (4.9)$$

mit e = gesuchte Dielektrizitätskonstante

e_x = Dielektrizitätskonstante bei 20°C und
 $1013.25 \text{ mbar} = 1.0005364$

p = Luftdruck in mbar

$p_0 = 1013.25 \text{ mbar}$ und

$t = \text{Lufttemperatur in } ^\circ\text{C}$

Daraus leitet sich für eine Erhöhung der Temperatur um 1°C eine Verminderung der Dielektrizitätskonstanten um $1.7 \cdot 10^{-6}$ ab, was mit den Gleichungen (3.1) und (3.2) in eine Frequenzänderung von $+0.015 \text{ Hz}$ umgerechnet werden kann. Auch dieser Einfluß ist nicht von praktischer Bedeutung.

Neben diesen funktional ableitbaren Temperatureinflüssen mußten aber noch weitere Abhängigkeiten befürchtet werden, unter anderem wegen der Verwendung von Operationsverstärkern bei der Erzeugung des Ausgangssignals. Um diese funktional nicht erfaßbaren Einflüsse zu bestimmen, wurden die Sensoren im Klimaschrank folgenden Versuchsreihen unterzogen :

- kurzfristiges Hochfahren von $+10^\circ\text{C}$ bis $+30^\circ\text{C}$ ohne und mit Maximalbelastung
- allmähliches Hochfahren der Temperatur von $+10^\circ\text{C}$ bis $+30^\circ\text{C}$ in einem Zeitraum von 24 Stunden.

Abb. 4.7 zeigt eine Schemazeichnung des Versuchsaufbaus. Temperaturen und Frequenzen werden hierbei auf einem gemeinsamen Schreibstreifen eines Linienschreibers KONTRON W+W 314 registriert, wobei die Frequenz mithilfe eines im Laborzähler Philips PM 6622 installierten D-A-Wandlers in analoge Spannungen umgewandelt wird.

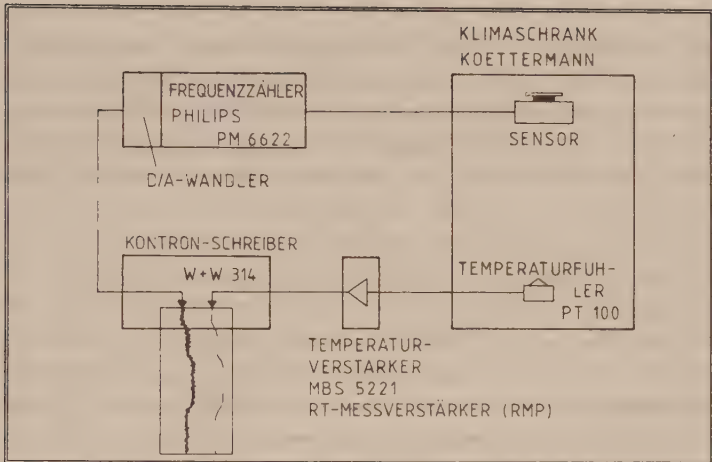


Abb. 4.7 : Versuchsaufbau zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Sensoren

Als Ergebnis zeigte sich, daß die Frequenz des Sensors mit einem Gradienten von etwa -0.7 bis -0.8 Hz/°C auf Temperaturänderungen reagiert. Das bedeutet, daß eine einseitige Erwärmung eines Sensors um 10°C eine einseitige scheinbare Verringerung des Gewichtes in diesem Gefäß um ca. 4 g oder eine einseitige scheinbare Absenkung der Meßflüssigkeit um ca. 0.25 mm verursachen würde, ohne die bei einer Höhenveränderung zu findende Entsprechung bei den anderen Sensoren. Dieser Fehler könnte daher erkannt und programmtechnisch abgefangen werden.

Verändert sich die Temperatur aller Sensoren einheitlich, so kann dies ebenfalls durch die programmtechnische Abstimmung der aufsummierten Wasserstände bzw. Gewichte auf den Ausgangszustand erfaßt werden.

4.1.7. Spannungsabhängigkeit des Sensors

Der Sensor wird über ein Netzteil mit 6 Volt Gleichspannung betrieben. Diese Spannung darf innerhalb eines relativ großen Bereichs, der aus Abbildung 4.8 ersichtlich ist, schwanken, ohne daß Veränderungen des Meßsignals auftreten. Da das Netzteil gewissermaßen als

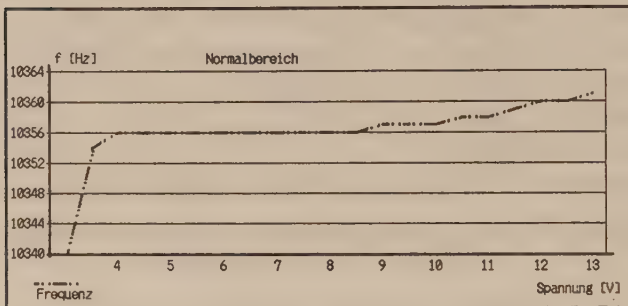


Abb. 4.8 : Einfluß der Spannung auf das Meßsignal

Filter zwischen Spannungsquelle und Sensor eingebaut ist, sind Fehlmessungen, die auf Spannungsschwankungen beruhen, weitgehend ausgeschlossen. Nach einem Ausfall des Netzes ist bei Wiederkehr der Spannung die vom Sensor erzeugte Frequenz korrekt und berücksichtigt auch Höhenänderungen, die während der Zeit des Netzausfalls eingetreten sind.

4.1.8. Einfluß von Luftdruckschwankungen auf den Sensor

Die einzige funktionale Abhängigkeit des Sensors vom Luftdruck läßt sich aus Gleichung (4.9) ableiten, wonach die Dielektrizitätskonstante als frequenzbestimmender Parameter des Meßwertaufnehmers vom Luftdruck abhängt. Der daraus ableitbare Frequenzgradient von 0.005 Hz/mbar qualifiziert den Sensor als praktisch luftdruckunabhängig. Zur Untersuchung dieser potentiellen Fehlerquelle wurde der Sensor in einem Druckzylinder Drücken zwischen 1050 mbar und 520 mbar ausgesetzt. Die dabei erhaltenen Meßwerte, die in Abb. 4.9 wiedergegeben sind, bestätigen zwar den theoretisch abgeleiteten Luftdruckgradienten mit einem signifikanten Wert von 0.0063 Hz/mbar aus einer Regressionsrechnung, zeigen aber genau so deutlich, daß im praktisch relevanten Bereich von 950 bis 1050 mbar ein Luftdruckeinfluß von maximal 0.5 Hz auftreten kann, der einem Höhenmeßfehler von etwa 0.02 mm entspricht und daher vernachlässigt werden kann.

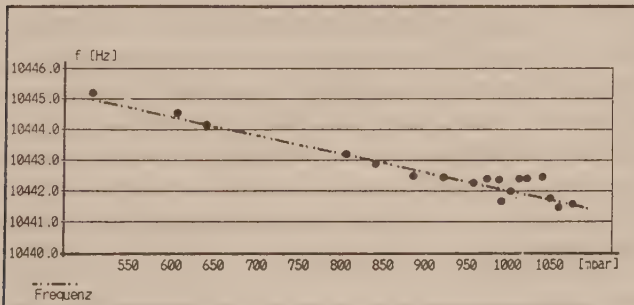


Abb. 4.9 : Frequenz-Luftdruck-Relation

4.1.9. Einfluß von Schiefstellungen des Sensors

Da die Digitalwaage als Sensor keine weiteren Umbauten erfährt, sondern wie beim normalen Gebrauch an einem zu untersuchenden Punkt auf eine vorhandene Fläche (z.B. bei einem Einsatz als Bodenpunkt) oder auf einer Wandkonsole aufgebaut werden soll und da mit auftretenden Höhenveränderungen in den meisten Fällen auch Schiefstellungen einhergehen, muß untersucht werden, wie die Frequenz- bzw. Gewichtsanzeige der Waage bei gekipptem Untergrund reagiert. Diese Untersuchung muß für die beiden Extremfälle

- Neigung parallel zum Tragblech der Parallelführung und
- Neigung senkrecht zum Tragblech

vorgenommen werden.

Mit einem Libellenprüfer wurde ein Sensor mit Gefäß und Füllung (ca. 1.7 kg) um ± 10 mm/m gekippt, ohne daß eine Änderung der Anzeige erfolgte.

Da sich die Belastung bei einer qualitativ hochwertigen Parallelführung mit dem Cosinus des Neigungswinkels auf den Wägearm übertragen müßte, also bei einer Schiefstellung von einem Gon oder ca. 3 mm pro 20 cm Basisbreite der Waage immer noch zu 99.988 %, wurde der Sensor zur Verifizierung dieser Aussage mithilfe einer Parallelführung bis zu einer Maximalneigung von ungefähr 100 mm/m gekippt.

In den Abb. 4.10 und 4.11 sind die sich dabei ergebenden Frequenzabweichungen gegen die Neigung aufgetragen. Die zu erwartende fehlerhafte Frequenz f' , die in den Abbildungen gestrichelt dargestellt ist, berechnet sich

mit der Belastung G , dem Koeffizienten A_1 aus der Kalibrierung in Kap. 4.1.2., der Nullfrequenz f_0 ohne Belastung und dem Neigungswinkel α gegen die Horizontale zu

$$f' = f_0 + A_1 \cdot G \cdot \cos \alpha \quad (4.10)$$

Da eine Neigung von 15 mm/m schon ohne Hilfsmittel erkannt wird, sollte es möglich sein, den Einfluß der

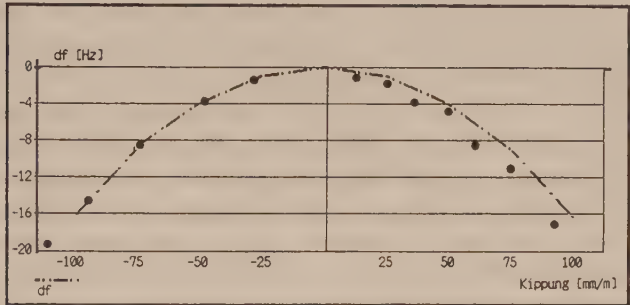


Abb. 4.10 : Frequenzänderungen bei einer Kippung des Sensors um die Querachse

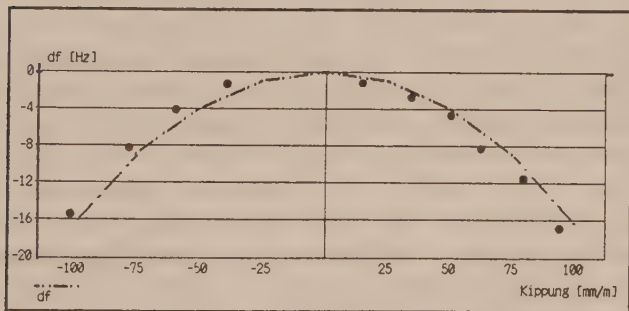


Abb. 4.11 : Frequenzänderungen bei einer Kippung des Sensors um die Längsachse

Schiefstellung durch Gegenmaßnahmen zu verhindern bzw. im Bedarfsfall durch die entsprechende Korrektur nach Messung der Neigung zu berücksichtigen.

4.1.10. Zuverlässigkeit der Parallelführung

Die Eignung des Sensors für den Einsatz als Meßgerät in einer Langzeitmeßeinrichtung darf jedoch nicht nur anhand der Qualität der elektronischen Bauteile, sondern muß in gleichem Maße mit der Zuverlässigkeit des einzigen mechanischen Bausteins des Sensors, der Parallelführung, beurteilt werden. Deren Qualität zeigt sich zum einen in Kap. 4.1.1. aus der Reproduzierbarkeit im Kurzzeitbereich. Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens kann dagegen die Prüfung der Stiftung Warentest herangezogen werden, die die Waage einem Dauerversuch mit 6.000 Lastwechseln zwischen Null- und halber Maximalbelastung unterzogen hat und die nach diesem Test keine Verringerung der Meßgenauigkeit festgestellt hat. Da die Frequenzdrift im Kurzzeitbereich sehr klein ist, wie sich in Kap. 4.1.4. gezeigt hat, kann dieser Test speziell zur Beurteilung des Wägearms dienen. Dieser Dauerversuch entspricht einer mehrjährigen Benutzung der Waage und läßt sie zumindestens für einen überschaubaren Zeitraum als geeignet erscheinen. Um die experimentell schwer ableitbare Eignung für den Dauereinsatz nicht zum unwägbaren Risiko werden zu lassen, kann die aus den in Kap. 4.1.4. genannten Gründen erforderliche Überprüfung der Nullfrequenz durch eine Entlastung des Sensors gleichzeitig als praktische Überprüfung der Parallelführung angesehen werden, für die kein zusätzlicher Aufwand erforderlich ist.

4.2. GEFÄSSE UND MESSFLÜSSIGKEIT

4.2.1. Einfluß der Genauigkeit des Gefäßradius auf die Genauigkeit der Höhenmessung

Der Gefäßradius spielt eine wichtige Rolle bei der Frage, wie sich Radiusungenauigkeiten auf die Höhenmeßgenauigkeit auswirken. Diese Ungenauigkeiten können sowohl von der *M e s s u n g* des Radius herrühren, die ja nach Gl. (3.3) für die Ableitung des Zusammenhangs zwischen Gewicht und Wasserhöhe von Bedeutung ist und die z.B. mit einem Innenmikrometer auf ± 0.1 mm durchgeführt werden kann, als auch aus der *G l a s p r o d u k t i o n*, die die Konstanz des Radius oder auch die Konstanz der Veränderung des Radius bei konischen Gläsern nur mit einer gewissen Unsicherheit garantiert.

Bei zylindrischen Gläsern ergibt sich eine Volumenzunahme dV in Abhängigkeit von der Änderung des Wasserstandes dh zu

$$dV = \pi \cdot R^2 \cdot dh . \quad (4.11)$$

In Umkehrung dieser Beziehung kann der Einfluß der meß- oder produktionsbedingten Unsicherheit dR des Radius für ein Volumenelement dV von 1 cm Schichtdicke als Faktor F berechnet werden, mit dem er sich auf die Höhenmeßgenauigkeit auswirkt :

$$dh = \frac{dV}{\pi \cdot R^2} \quad (4.12)$$

$$d(dh) = - \frac{2 \cdot dV}{\pi \cdot R^3} dR \quad \Rightarrow \quad d(dh) = F \cdot dR \quad (4.13)$$

Der Faktor F ist in Abb. 4.12 wiedergegeben und stellt

ein Argument für möglichst große Gefäßradien dar. Die Kompromißposition der verwendeten Gefäße ist ebenfalls eingetragen. Für die gewählten Gläser liegt F bei 0.3.

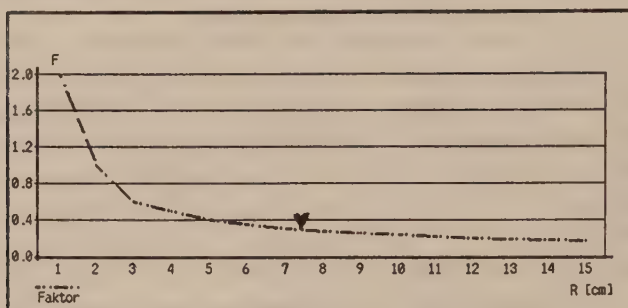


Abb. 4.12 : Einflußfaktor der Radiusunsicherheit dR auf die Höhenmessung

4.2.2. Gefäßgröße und Dichteschwankung der Meßflüssigkeit im Verbindungsschlauch

Ein weiterer Aspekt bei der Wahl der Gefäßgröße betrifft die Auswirkungen von Dichteänderungen der Meßflüssigkeit im Verbindungsschlauch auf die Messungen. Da sich der betrachtete Teil der Meßflüssigkeit unterhalb der Wägezellen befindet, wirken sich seine Volumenschwankungen im Gegensatz zu denen im Gefäß meßwertverfälschend aus, wenn sie unsymmetrisch auftreten.

Das für diesen Aspekt relevante Ausdehnungsverhalten der Meßflüssigkeit ist auf der Basis einer Tabelle aus /KOHLRAUSCH 1968/ in Abb. 4.13 wiedergegeben mit der Dichte von Wasser bei Normaldruck als Funktion der Temperatur, explizit auszudrücken mit

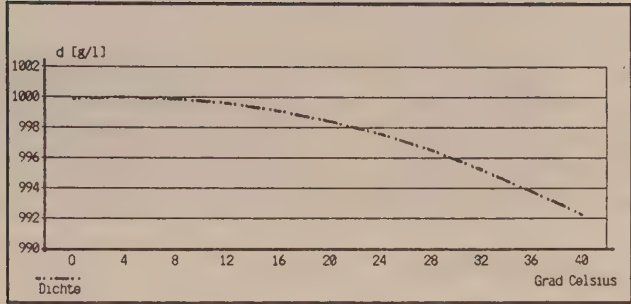


Abb. 4.13 : Wasserdichte als Funktion der Temperatur

$$p = 1 - (t-4)^2 \cdot a \quad (4.14)$$

mit p = Dichte des Wassers in kg/dm^3 ,
 t = Temperatur des Wassers in $^{\circ}\text{C}$ und
 $a = 6.0185 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{dm}^3 \cdot (^{\circ}\text{C})^2)$,

woraus sich beispielsweise Dichtegradienten von

$$\frac{dp}{dt} = - 0.0002 \text{ kg}/(\text{dm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}) \text{ bei } t_0 = 20^{\circ}\text{C} \text{ und}$$

$$\frac{dp}{dt} = - 0.0003 \text{ kg}/(\text{dm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}) \text{ bei } t_0 = 30^{\circ}\text{C}$$

ableiten. Bei einer Dichte des Mediums von $p \approx 1$ sind die Dichtegradienten mit umgekehrtem Vorzeichen identisch mit dem räumlichen Ausdehnungskoeffizienten β ($\beta \approx 0.0002$ bzw. $0.0003 [1/^{\circ}\text{C}]$). Wenn sich daher z.B. ein 10m langes Stück Schlauch mit ϕ 1 cm als ansteigende Zuführung zu einem Sensor einseitig um $t = +5^{\circ}\text{C}$ er-

wärmt, dann vergrößert sich in diesem Teil des Schlauches das Volumen um

$$dV \approx 785 \text{ cm}^3 \cdot 5^\circ\text{C} \cdot \beta \approx 0.78 \text{ bzw. } 1.18 \text{ cm}^3.$$

Bei einem Gefäß mit einem Radius von $R = 7.5 \text{ cm}$ verursacht dies eine Höhenänderung des Flüssigkeitsspiegels um ca. $dh = 0.05 \text{ mm}$, während der Einfluß bei einem Gefäß mit $R = 2 \text{ cm}$ schon mehr als vierzehnmal so groß wäre. Damit ergibt sich ein weiteres wichtiges Argument für Gefäße mit großer Grundfläche.

4.3. FREQUENZZÄHLER

Um den in Kap. 3.3.2. beschriebenen Zusatzbaustein zur Messung der in den Sensoren produzierten Frequenzen auf seine Eignung zu untersuchen, wurden mit einem Frequenzgenerator der Marke TOELLNER TE 7706 Frequenzen erzeugt, die über eine Frequenzweiche gleichzeitig mit dem Laborfrequenzzähler Philips PM 6622 (Abb. 4.14) der Güteklasse 10^{-7} als auch mit dem Zusatzbaustein zum Commodore C64 gemessen wurden. Der Laborzähler PM 6622 wird in regelmäßigem Abstand mit den Sollfrequenzen 1 MHz und 10 MHz verglichen, die über den Sender DCF 77 von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig ausgestrahlt werden. Aus diesen Vergleichsmessungen ergibt sich für den Philips PM 6622 eine nachgewiesene Zuverlässigkeit von 1×10^{-6} , die ausreicht, um die mit diesem Gerät getätigten Messungen als fehlerfrei gegenüber dem Zusatzbaustein des Commodore C64 anzusehen. Bei zehn Meßreihen in dem relevanten Bereich zwischen 8 kHz und 12 kHz konnte n i c h t e i n m a l eine Differenz festgestellt werden. Da der Zusatzbaustein mit dem angegebenen Auswerteprogramm

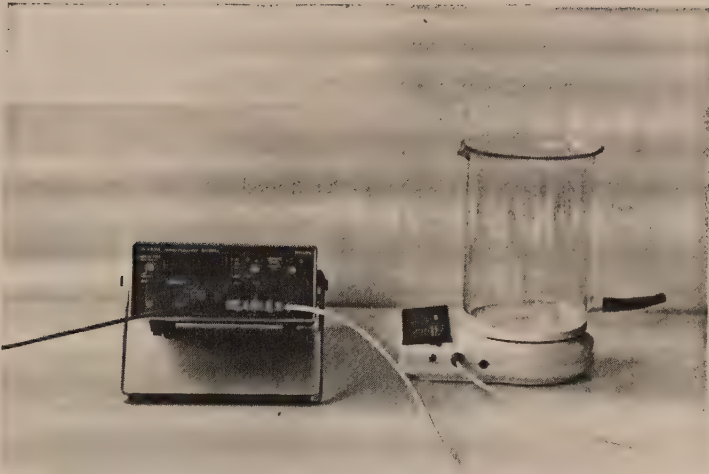


Abb. 4.14 : Frequenzzählung mit PHILIPS PM 6622

Bruchteile von 1 Hz nicht anzeigt, ist eine Einschätzung der Frequenzmeßgenauigkeit des Bausteins auf ± 1 Hz zulässig und kann eher noch als zu groß und pessimistisch angesehen werden.

4.4. KALIBRIERUNG DES SYSTEMS

4.4.1. Einzelne Meßeinheit und Datenerfassung

Mit den Faktoren, die aus einer Messung der Innenradien der Gefäße mit einem Innenmikrometer ($\pm 0.1 \text{ mm}$) abgeleitet wurden und die für jedes Gefäß den Zusammenhang zwischen dem gemessenen Gewicht und dem Wasserstand im Gefäß angeben, wurde jedes Gefäß im Einzelversuch mit ein- und demselben Vergleichsgefäß kalibriert, indem es

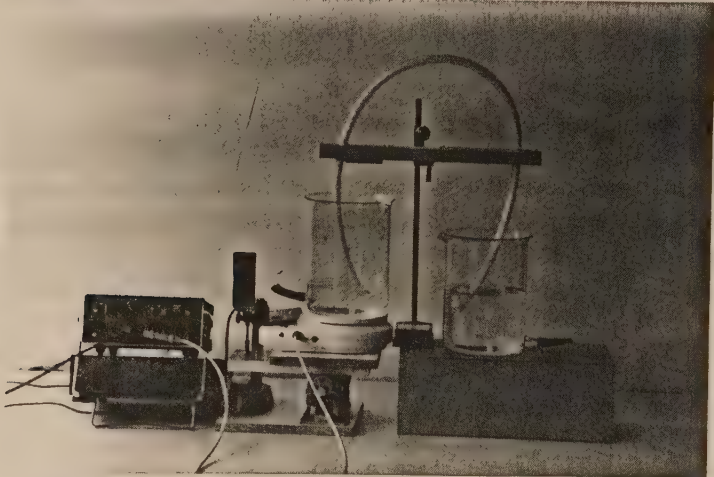


Abb. 4.15 : Einzelkalibrierung der Gefäße

mit einer höhenveränderlichen Parallelführung über einen Meßbereich von 5 cm in mit dem HEIDENHAIN-Meßtaster MT 30 gemessenen Sollschritten verfahren wurde. Dabei wurde der Taster, mit dem in einem Zuge nur 30 mm gemessen werden können, genullt und verschoben, um den Meßbereich überdecken zu können. Zur Abkürzung der Einschwingzeiten der Flüssigkeit nach einer Höhenverschiebung wurden nur kurze Verbindungsschläuche gewählt. Um

auch noch jeden Kraftschluß über die Zuführung der Meßflüssigkeit auszuschalten - bei einer Höherverlagerung des Gefäßes könnte noch ein Teil des Anschlußschlauches mitgewogen werden müssen -, wurde der in Abb. 4.15 dargestellte Versuchsaufbau gewählt, bei dem der Ausgleich der Flüssigkeitsniveaus oberhalb (!) der Gefäßöffnungen vonstatten ging. Bei dieser Kalibrierung zeigte sich, daß die Umrechnungsfaktoren so gut bestimmt worden waren, daß die mit dem Meßtaster gemessenen Soll-Höhenverlagerungen im Bereich von etwa 10 cm mit einer Maximalabweichung von 0.2 mm angezeigt wurden, wodurch die "innere Genauigkeit" des Systems bestätigt wurde und der Maßstabsfehler als unter 0.5 % liegend festgehalten werden kann.

4.4.2. Mehrstellensystem mit 5 Sensoren

Zur Überprüfung der aus den Innenradiusmessungen abgeleiteten Faktoren für die Umrechnung der Belastung in Wasserstand kann die Anlage auch durch Zugabe vorher gewichtsmäßig bestimmter Wassermengen kalibriert werden. Bei diesem Vorgehen müssen sich bei allen Gefäßen gleiche positive Wasserstandsänderungen errechnen, bzw. wenn dieser Vorgang mit der programmierten Anpassung der Gesamtwasserstände auf die Nullmessung erfolgt, dann sollten die zum Beispiel auf dem Bildschirm angezeigten Höhen aller Punkte unter Berücksichtigung des Einschwingverhaltens (10 min Wartezeit !) konstant bleiben. Dieser Kalibriervorgang überprüft jedoch nur das richtige Verhältnis der Faktoren untereinander. Geringsfügige Maßstabsfehler, die allen Faktoren gemeinsam anhaften, können so nicht aufgedeckt werden. Hierzu ist in jedem Fall ein direkter Vergleich Höhenänderung - Gewichtsänderung erforderlich.

5. ZUR AUSWERTUNG EINES MEHRSTELLENSYSTEMS

5.1. DAS FUNKTIONALE MODELL DES MEHRSTELLENSYSTEMS

Beim Ausbau eines Schlauchwaagensystems vom herkömmlichen 2-Stellen-Meßsystem zum n-Stellen-Meßsystem ergeben sich auswertetechnische Besonderheiten bei der Ableitung der Höhenänderungen dh_i der Aufstellpunkte aus den Wasserstandsänderungen dw_i in den Gefäßen.

Eine Höhenänderung dh_i des Punktes i führt zu einem hydrostatischen Gleichgewicht auf neuem Niveau, das dadurch festgelegt wird, daß sich die Menge der Meßflüssigkeit, die der Höhenänderung dh des i -ten Gefäßes entspricht, auf alle Gefäße des Systems verteilt. Zur Vereinfachung der Gleichungen, die diesen Vorgang wiedergeben, wird ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit von einem System mit n gleichgroßen, zylindrischen Gefäßen ausgegangen.

Mit /BUSCH 1981/ lassen sich die Wasserstandsänderungen dw in allen Gefäßen als Funktion der Höhenänderung dh_i im Punkt i berechnen nach :

$$dw_k = \frac{dh_i}{n} \quad \text{für } k = 1 \dots n \text{ ohne } i \quad (5.1)$$

$$dw_i = \frac{dh_i}{n} - dh_i = - \left(\frac{n-1}{n} \right) \cdot dh_i \quad (5.2)$$

Die beim vorliegenden System gemessenen Gewichtsänderungen sind für diesen Ansatz zuerst noch in Wasserstandsänderungen zu transformieren nach

$$dw_i = \frac{dM}{\rho_w \cdot F_i}$$

mit dw_i = Wasserstandsänderung in cm,

dM = gemessene Gewichtsänderung in g,

ρ_w = Dichte der Meßflüssigkeit ($\approx 1 \text{ g/cm}^3$) und
 F_1 = Grundfläche des Gefäßes in cm^2 .

Der Wasserstand im Punkt 1 ändert sich demnach unter der Einwirkung der Höhenänderungen aller Punkte des Systems um den Betrag dw_1 :

$$dw_1 = -\left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot dh_1 + \frac{1}{n} \cdot dh_2 + \frac{1}{n} \cdot dh_3 + \dots + \frac{1}{n} \cdot dh_n \quad (5.3)$$

Für die Wasserstandsänderungen dw_i aller Gefäße kann daher zusammenfassend angegeben werden :

$$W = A \cdot H \quad \text{mit} \quad (5.4)$$

$$W = \begin{pmatrix} dw_1 \\ dw_2 \\ \vdots \\ dw_n \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} dh_1 \\ dh_2 \\ \vdots \\ dh_n \end{pmatrix} \quad \text{und}$$

$$A = \frac{1}{n} \cdot \begin{pmatrix} 1-n & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1-n & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1-n & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1-n \end{pmatrix}$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems zur Berechnung von H ist zu vergleichen mit der freien Ausgleichung eines Höhennetzes ohne Anschlußpunkte. Wegen $\det A = 0$ kann H aus Gl. (5.4), wie in /BENNING, THEISSEN, WASCHKE 1987/ gezeigt, nur abgeleitet werden unter Beseitigung des Rangdefektes d ($d = 1$), was z.B. durch zusätzliche Einführung der Bedingung

$$\sum dh_i = 0 \quad (5.5)$$

erreicht werden kann. Dies entspräche einer Ränderung der rangdefekten Ausgangsmatrix A , die wie eine rangdefekte Normalgleichungsmatrix N durch Einführung einer Restriktionsmatrix B nach /KOCH 1983/ in die Pseudoinverse N^+ überführt werden kann.

Nach /BENNING 1987/ ergibt sich daraus ohne Näherung in strenger Form :

$$H = A \cdot W . \quad (5.6)$$

Für den Punkt 1 bedeutet dies, daß sich seine Höhenänderung dh_1 aus den Wasserstandsänderungen dw_1 aller Punkte ableitet nach :

$$dh_1 = - \left(\frac{n-1}{n} \right) \cdot dw_1 + \frac{1}{n} \cdot dw_2 + \frac{1}{n} \cdot dw_3 \quad \dots + \frac{1}{n} \cdot dw_n \quad (5.7)$$

Diese Berechnung könnte im Auswerteprogramm ohne großen Speicherbedarf in Form einer Schleifenabfrage durchgeführt werden. Zur Stabilisierung des Systems müßten allerdings noch alle neuen Höhen der Aufstellpunkte rechnerisch auf einen Punkt bezogen werden, der als Festpunkt des Systems gewählt wird.

Zur Berechnung der Höhenänderungen über die zunächst nicht invertierbare Matrix A kann aber auch folgender Weg beschritten werden :

Statt die Matrix A zu rändern, verfügt man über die Höhenänderung des letzten Punktes, dessen Koeffizienten a_n sich im Gleichungssystem in der letzten Spalte finden und nach

$$a_n = - \sum (a_j) \quad j = 1 \dots n-1 \quad (5.8)$$

als Linearkombination der Koeffizienten in den vorangehenden Spalten darstellen lassen, und setzt

$$dh_m = 0 .$$

(5.9)

Damit entfallen die letzte Zeile und Spalte von A und es ergibt sich eine quadratisch-symmetrische Matrix A' mit m = n-1 Zeilen und Spalten. Die Inverse A'^{-1} kann gefunden werden mit

$$A'^{-1} = \begin{vmatrix} -2 & -1 & -1 & -1 & . & . & -1 \\ -1 & -2 & -1 & -1 & . & . & -1 \\ -1 & -1 & -2 & -1 & . & . & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -2 & . & . & -1 \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ -1 & -1 & -1 & -1 & . & . & -2 \end{vmatrix} \quad (5.10)$$

Die Richtigkeit dieser für alle n (n = Anzahl der Sensoren) geltenden Inverse läßt sich leicht aus

$$A' - A'^{-1} = E \quad (E = \text{Einheitsmatrix})$$

beweisen, da sich hierbei für alle Diagonalelemente

$$\frac{1-n}{n} \cdot (-2) + (n-2) \cdot \frac{1}{n} \cdot (-1) = 1 \quad (5.11)$$

und für alle anderen Elemente

$$\frac{1-n}{n} \cdot (-1) + \frac{1}{n} \cdot (-2) + (n-3) \cdot \frac{1}{n} \cdot (-1) = 0 \quad (5.12)$$

ergibt. Mit diesem Lösungsweg ergibt sich als Alternative zu Gl. (5.7) für die Berechnung von dh₁ :

$$dh_1 = -2 \cdot dw_1 - dw_2 - dw_3 - . . . - dw_{n-1} \quad (5.13)$$

unter der Annahme, daß alle neuen Höhen auf den n - ten Punkt als Festpunkt des Systems bezogen werden sollen. Durch eine geeignete Kombination aus Gl. (5.7) und Gl. (5.13) kann schließlich die Beziehung zwischen dh und dw komprimiert angegeben werden mit :

$$dh_i = - dw_i . \quad (5.14)$$

Alle so berechneten Höhenunterschiede sind zur besseren Vergleichbarkeit der Höhengeneration verschiedener Meß-epochen auf einen der Sensorstandpunkte als invarianten Bezugspunkt P des Systems umzurechnen nach :

$$dh_i = - dw_i - (- dw_p) \quad (5.15)$$

Zur Verifizierung dieser Berechnungen ist das Simulationsprogramm SIMULA erstellt worden, mit dem unter beliebiger Vorgabe von Höhenänderungen für die Punkte des Systems die sich daraus ergebenden Wasserstandsänderungen und umgekehrt berechnet werden können. In diesem Programm können auch die Einflüsse der Aufsetzflächenkorrektur (Kap. 4.1.5.) untersucht sowie die in Kap. 2. genannten Möglichkeiten des Rechnereinsatzes und damit das komplette Zusammenspiel eines Mehrstellensystems mit Auswertung getestet werden.

5.2. FEHLERFORTPFLANZUNG IM MEHRSTELLENSYSTEM

Mit Gl. (5.15) ist die Ausgangsgleichung für eine Fehlerbetrachtung gegeben, die die Einwirkung der Ungenauigkeiten von n Wasserstandsbestimmungen auf die daraus abgeleiteten Höhenänderungen der Punkte abschätzen soll.

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich

$$\sigma(dh_1) = \sqrt{\sigma^2(dw_1) + \sigma^2(dw_p)} \quad . \quad (5.16)$$

Da alle $\sigma(dw)$ als gleich groß angenommen werden können, gilt für jede Höhenbestimmung

$$\sigma(dh) = \sigma(dw) \cdot \sqrt{2} \quad . \quad (5.17)$$

Mit einem um ca. 50% erhöhten Wert der Standardabweichung $\sigma(dw)$ für die Bestimmung der Wasserstandsänderung in einem Gefäß kann demnach unabhängig von der Anzahl n der Gefäße im System eine untere Schranke für die Genauigkeit der Bestimmung der Höhenänderung angegeben werden, die allerdings nur die zufälligen Fehleranteile des Meßvorgangs erfaßt.

Durch die Anpassung der aufsummierten Meßwerte an die Meßwertsumme der Nullmessung ergibt sich bei relativ kleiner Anzahl von Sensoren unter Umständen sogar ein kleiner Genauigkeitsgewinn für das Gesamtsystem dadurch, daß bei diesem Vorgang der Betrag eines größeren zufälligen Fehlers reduziert wird.

Die Standardabweichung $\sigma(dw)$ setzt sich schließlich zusammen aus den Anteilen der Sensorkalibrierung, der Frequenzmessung und der Gefäßeinflüsse und kann, wenn äußere Störeinflüsse außer Acht bleiben, abgeschätzt werden zu $\sigma(dw) = \pm 0.1 \text{ mm}$, so daß ein $\sigma(dh) < \pm 0.2 \text{ mm}$ erreichbar sein sollte.

6. ERSTE ERFAHRUNGEN IM PRAKTISCHEN EINSATZ

6.1. MESSUNG UNTER DEM EINFLUSS MECHANISCHER STÖRUNGEN

Ein erster praktischer Einsatz des neu entwickelten Schlauchwaagensystems erfolgte zum Zwecke der Messung temperaturbedingter Verformungen einer Stahlverbundkonstruktion über einen Zeitraum von mehr als 20 Stunden. Dabei handelt es sich um eine ca. 65 m lange Stahlbrücke (Abb. 6.1), deren "Fachwerk" durch den Tagesgang der Sonne aufgeheizt und infolge der einseitigen Bestrahlung und der daraus resultierenden Dehnungen de-



Abb. 6.1 : Meßobjekt Stahlbrücke

formiert wird. Von Interesse ist hier das vertikale Verhalten eines unteren Riegels, das zunächst mit herkömmlichen Methoden, nämlich Präzisionsnivellement von einem Standpunkt aus, gemessen wurde.

Zur Bestimmung der Verformung mit der neu entwickelten Schlauchwaage wurden 5 Sensoren auf einer Länge von ca. 65 m gleichmäßig auf dem Riegel verteilt. Die Sensoren



Abb. 6.2 : Aufbau des Sensors am Auflager



Abb. 6.3 : Sensor mit Schutzkasten

wurden unmittelbar auf dem Riegel aufgestellt und gegen Windeinfluß und direkte Sonnenbestrahlung mit einem Holzkasten geschützt (Abb. 6.2 und 6.3). Der Verbindungsschlauch verlief ohne Abdeckung hinter dem 25 cm hohen Kragen des Riegels, zusammen mit den Kabeln für Stromversorgung und Frequenzabfrage.

Die Lufttemperatur wechselte innerhalb des Messungszeitraumes zwischen 14°C und 26°C bei im wesentlichen wolkenfreiem Himmel.

Abb. 6.4 gibt das Verhalten mehrerer Punkte des Riegels als Funktion der Zeit wieder, wobei als Bezugshöhe die Höhen der beiden Punkte gewählt wurden, die sich in unmittelbarer Nähe und oberhalb der Auflager befinden. Alle Nivellementspunkte sind als Bodenpunkte ausgebildet und mit halbrunden Metallbolzen vermarktet. Der Aufstellpunkt des Schlauchwaagensensors 3 konnte in unmittelbarer Nähe des Nivellementspunktes 3 gewählt werden, so daß die beiden voneinander völlig unabhängigen Meßmethoden hier praktisch in einer In-situ-Kalibrierung des Schlauchwaagensystems verglichen werden können. Die Ergebnisse des Präzisionsnivellements, das mit einem NI 002 von JENOPTIK durchgeführt wurde, können aufgrund der durch Doppelmessung erzielten Kontrollierbarkeit mit bei ± 0.1 mm liegender Standardabweichung zumindest als übergeordnet genau angesehen werden.

Für die Messung kam erschwerend hinzu, daß in kürzesten Abständen Schwertransportzüge die Brücke befuhren und so jedesmal für ein Anschwingen des Schlauchwaagensystems sorgten. Bei etwa 15 Zügen pro Stunde wurde versucht, durch eine gleitende Mittelbildung der Werte für

NIVELLEMENT

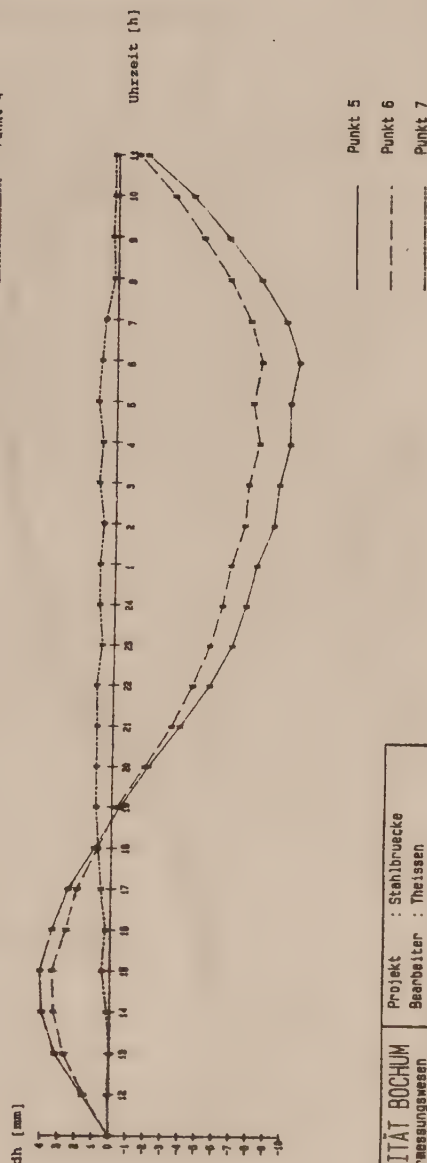


Abb. 6.4 : Ergebnisse des Präzisionsnivelements

DEFORMATIONSMESSUNG STAHLBRUECKE SCHLAUCHWAAGENMESSUNG

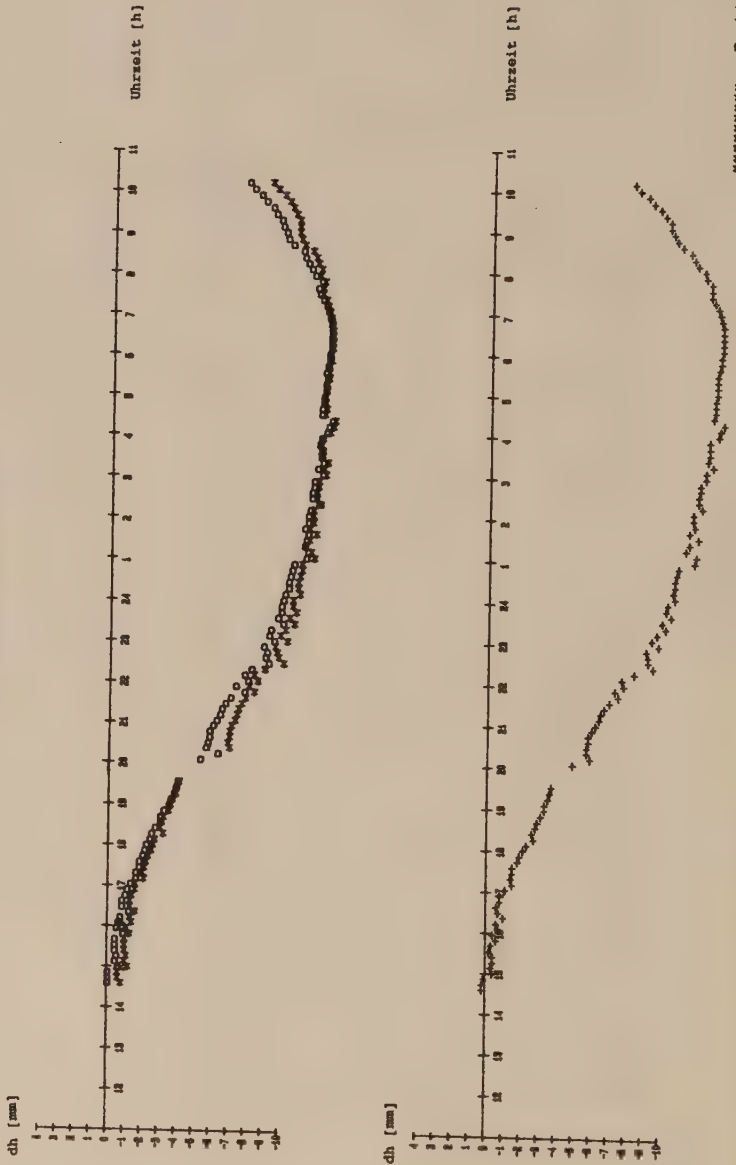


Abb. 6.5 : Ergebnisse der Schlauchwaagenmessung

einen Zeitraum von etwa 5 min eine Integration über die Zeit zu erreichen.

Die Schlauchwaagenmeßwerte wurden auf der Floppy-disk des Commodore 64 doppelt gespeichert, um bei Stromausfall während einer Diskettenoperation die zweite Datei mit den bis dahin angefallenen Meßwerten auswerten zu können. Die numerisch-graphische Auswertung der Messungen erfolgt im vollautomatischen Datenfluß auf einem IBM-kompatiblen Personal-Computer mit angeschlossenem Plotter HP 7475A, der neben der graphischen Darstellung der Schlauchwaagenmessungen auch einen direkten Vergleich mit den Nivellementsergebnissen ermöglicht. In Abb. 6.5 sind die Ergebnisse der drei Sensoren aufgetragen, die auf dem verformbaren Teil der Brückenkonstruktion standen.

Die auf die Nivellementszeiten interpolierten Meßwerte ergaben eine numerische Übereinstimmung mit Maximalabweichungen von 0.6 mm. Eine Berechnung der Standardabweichung ergab für 19 Vergleichswerte einen Wert von $\sigma_n = \pm 0.4$ mm für eine Höhendifferenz zwischen Punkt 3 und dem Auflager. Davon kann ein kleiner, kaum zu quantifizierender Anteil aus der Meßunsicherheit des Präzisionsnivelliers sowie aus den nicht völlig durch Filterung zu eliminierenden Störungen durch den Zugverkehr herrühren.

6.2. MESSUNG OHNE MECHANISCHE STÖRUNGEN

In einem weiteren Einsatz war ebenfalls der Temperaturgang einer Stahlbrückenkonstruktion zu bestimmen. Bei dieser Eisenbahnbrücke mit einer sich in Ost-West-Richtung erstreckenden Hohlkastenkonstruktion fehlte jeglicher Schienenverkehr, so daß hier zwar ohne mechanische

Störungen, dafür aber mit um so größeren Temperatureinflüssen gemessen werden mußte (Abb. 6.6). Bei dieser Messung konnten



Abb. 6.6 : Messobjekt Stahlbrücke mit Sensoren

alle Sensoren in unmittelbarer Nachbarschaft der Bolzen aufgestellt werden, die wiederum für das zu Vergleichszwecken auszuführende Präzisionsnivellement angebracht worden waren. In Abbildung 6.7 sind die mit Präzisionsnivellements-ausrüstung ermittelten Höhenänderungen dargestellt, während in den Abb. 6.8 bis 6.12 für alle Sensoren die Differenzen aufgetragen sind, die sich aus einem Vergleich der beiden Meßverfahren ergeben.

Bei dieser Messung schwankten die Lufttemperaturen zwischen 21°C am Tage und 6°C in der Nacht, wobei die Tem-

DEFORMATIONSMESSUNG STAHLBRUECKE

NIVELLEMENT

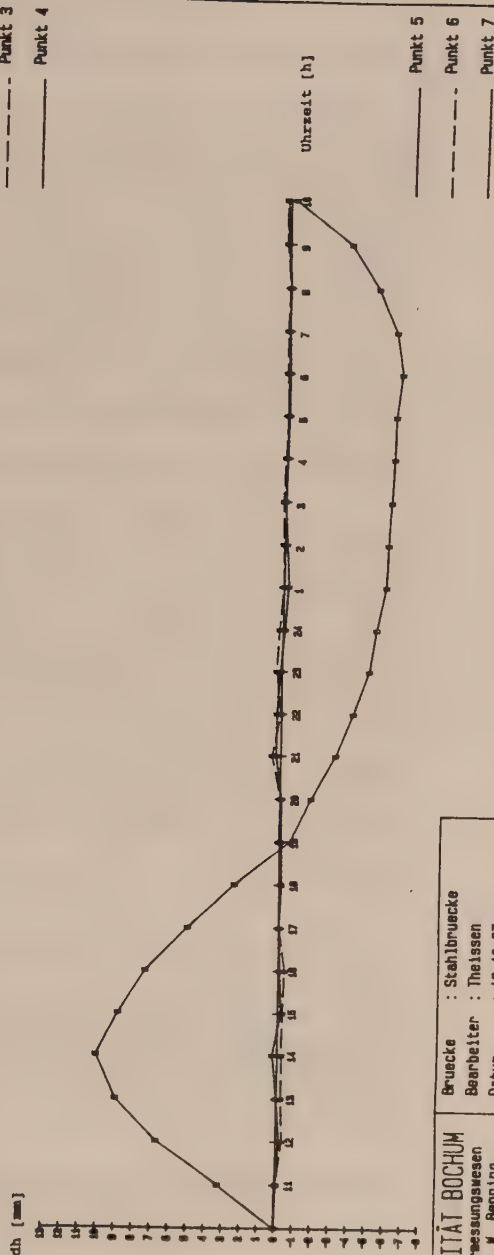
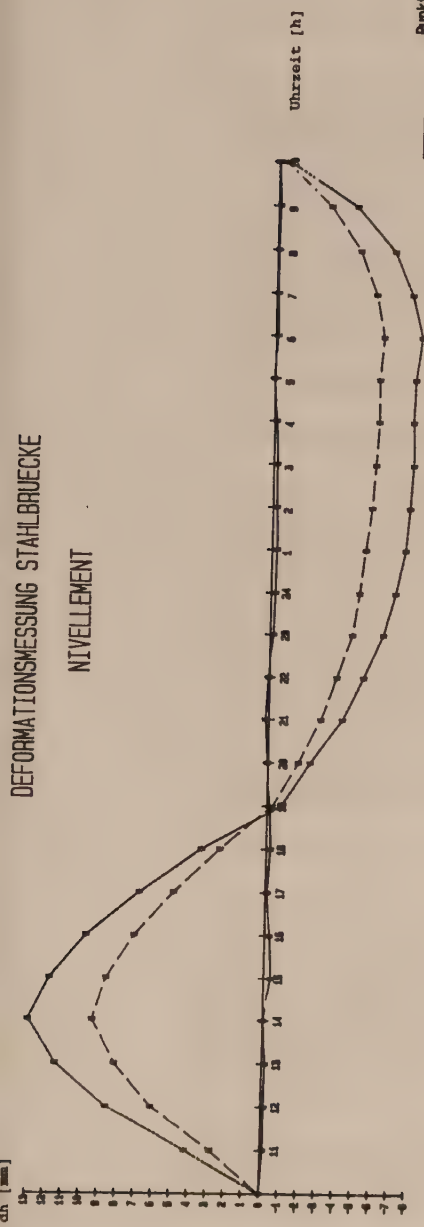


Abb. 6.7 : Ergebnisse des Präzisionsnivelements

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
Institut für Vermessungswesen
Prof. Dr.-Ing. M. Benning

Brücke : Stahlbrücke
Bearbeiter : Theissen
Datum : 19.10.87

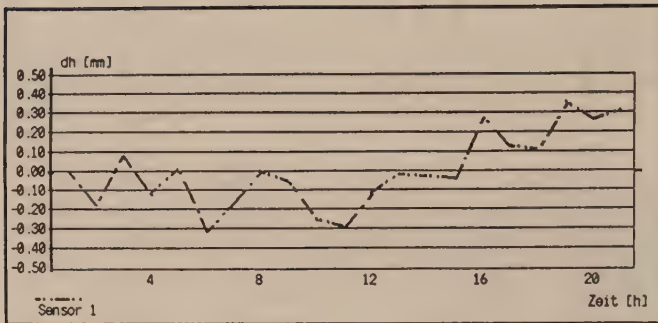


Abb. 6.8 : Differenzen (NI 002 - Sensor 1)

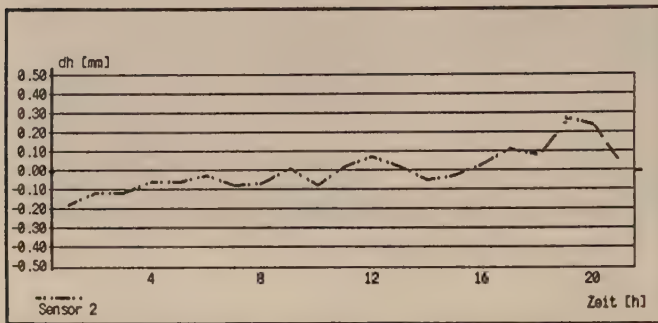


Abb. 6.9 : Differenzen (NI 002 - Sensor 2)

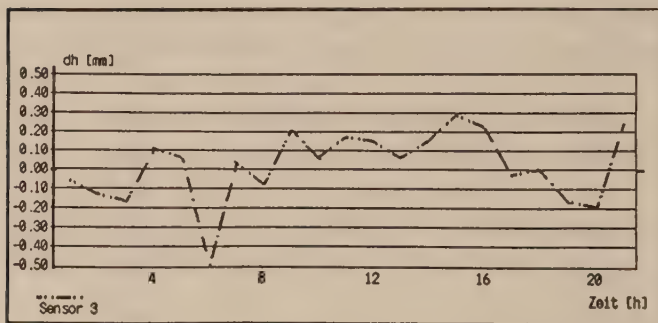


Abb. 6.10 : Differenzen (NI 002 - Sensor 3)

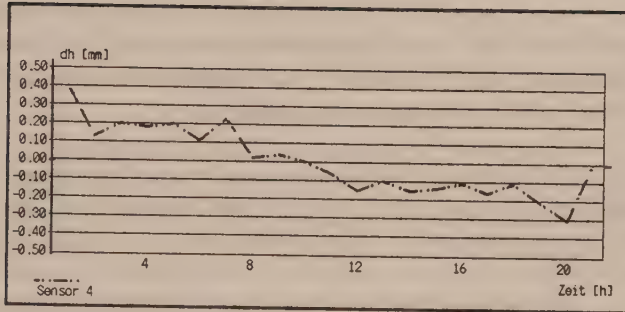


Abb. 6.11 : Differenzen (NI 002 - Sensor 4)

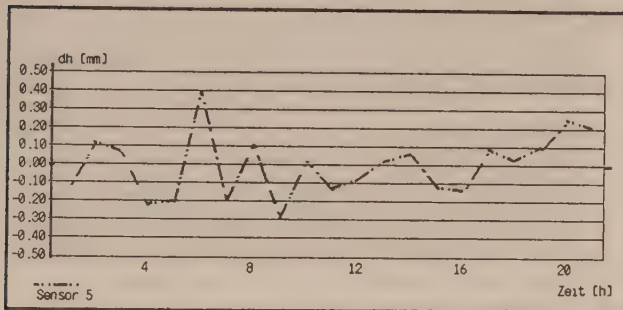


Abb. 6.12 : Differenzen (NI 002 - Sensor 5)

peratur der Oberfläche des Stahlkastens, auf dem die Sensoren und die Verbindungsleitungen aufgebaut waren, infolge der direkten Sonneneinstrahlung am Tage bis zu 27°C anstieg.

Die Beträge der Differenzen aus den Abb. 6.8 bis 6.12 liegen im Mittel bei 0.13 mm. Da bei diesem Vergleich

die Ergebnisse der Messungen mit dem NI 002 von JENOPTIK nicht mehr als übergeordnet genau angesehen werden können (mit Zielweiten bis zu 45 m), kann die Standardabweichung für die Schlauchwaagenmessung nur über eine Schätzung ermittelt und mit einem Wert von etwa ± 0.1 bis ± 0.2 mm eingegrenzt werden.

Aus den Schlauchwaagenmessungen ergibt sich die temperaturbedingte Deformation von Brücken demnach mit hinreichender Aussagekraft. Mit diesem neu entwickelten Schlauchwaagensystem hat man eine kostengünstige Ausrüstung an der Hand, die es ermöglicht, unter wesentlicher Personaleinsparung und vor allem unter Vermeidung zeitaufwendiger und kräfteraubender Meßtätigkeit das vertikale Verformungsverhalten von Ingenieurbauwerken mit einer Zuverlässigkeit und Sicherheit zu ermitteln und zu beschreiben, die der Aussagekraft von Präzisionsnivellements vergleichbar ist.

7. AUSBLICK UND ZUSAMMENFASSUNG

7.1. WEITERENTWICKLUNG DER HARDWARE

Auf der Basis der in Kap. 3.3. vorgestellten Hardware für die Erfassung und Weiterverarbeitung der Messwerte wurde eine kompaktere Version konzipiert, die nach Vorgabe der Anforderungen in einem Aufgabenkatalog von einem Ingenieurbüro für Computertechnik ebenfalls unter weitgehender Verwendung von fertigen Modulen zusammen-

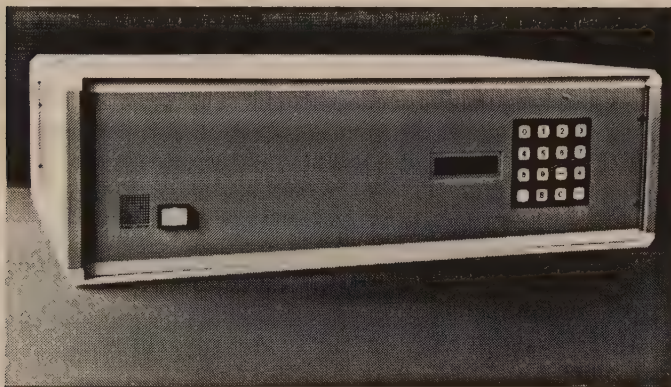


Abb. 7.1 : Kompaktversion der Meßwerterfassung

gebaut wurde. Im wesentlichen sind in dem in Abb. 7.1 dargestellten 19"-Einschub folgende Module zu finden :

- a) Prozessorkarte (Z80) mit Programmspeicher und verschiedenen Schnittstellen,
- b) 16-er Tastatur und LCD-Display,
- c) akkugepufferter Datenspeicher,
- d) Input/Output-karte für Datentransfer,
- e) Scannerkarte zur Umschaltung zwischen den Kanälen
- f) Frequenzzähler und

g) Netzteile zur Versorgung von Registrierung und Sensoren.

Der einzige Nachteil dieses Systems besteht darin, daß die gemessenen Höhenveränderungen nicht mehr - quasi in Echtzeit - auf dem Bildschirm der Geometrie des zu beobachtenden Bauwerks zugeordnet werden können, sondern nur noch sequentiell in langsamem Wechsel im Display erscheinen. Nach jedem Stromausfall startet sich das System selbständig mit den Werten aus der "Parameter-datei". Für die Daten besteht eine Sicherheitsreserve von vier Wochen, so daß die Gefahr eines Datenverlustes nur gering ist. Für den Sensor ist der Einbau in einen Schutzkasten in der Art von Abb. 7.2 geplant, wobei ein Gefäß mit rechteckiger, aber gleichgroßer Grundfläche wie bisher verwendet wird, so daß alle Ableitungen zur Auflösung und Genauigkeit des Systems ihre Gültigkeit behalten.

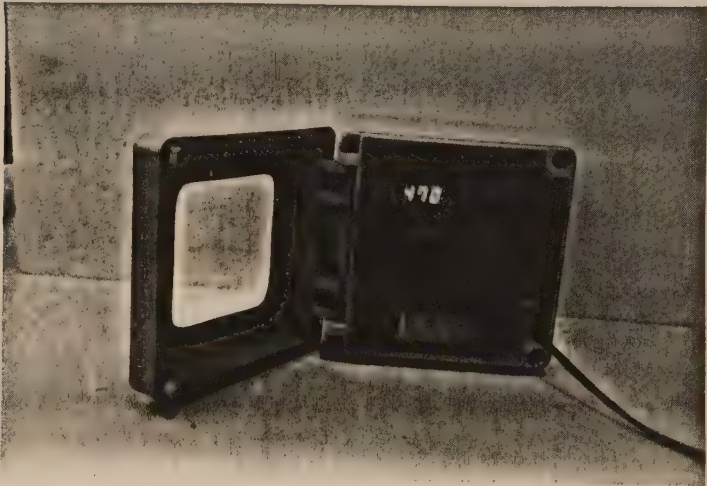


Abb. 7.2 : Geplanter Sensorumbau

7.2. ZUSAMMENFASSUNG UND WERTUNG

Ausgehend von der immer häufiger gestellten Forderung, vertikale Veränderungen an Ingenieurbauwerken zu beobachten und kontinuierlich zu registrieren, wird eine Schlauchwaagenmeßeinrichtung aus handelsüblichen Modulen zusammengestellt, die nach dem Prinzip der Gewichtsmessung arbeitet, d.h. die Höhe der Meßflüssigkeit in den Standgefäßen wird aus ihrem Gewicht abgeleitet. Die Zielsetzungen "Low-Cost-System" auf der einen und Erfüllung ingenieurgeodätischer Ansprüche auf der anderen Seite führen zu einem System, das eine geringfügig umgebaute Digitalwaage und den Computer Commodore C64 - zwei Geräte, deren Kontakt zueinander zunächst nicht vorgesehen ist - zu einer leistungsfähigen hydrostatischen Meßeinrichtung verbindet.

Aus dem Markt für Computerzubehör werden die fehlenden Zwischenglieder beschafft, die die Meßkette vom Sensor bis zur Registrierung vervollständigen. Es sind dies ein Frequenzzähler als Baustein zur Erfassung der in der Digitalwaage erzeugten Informationen, eine Erweiterung der vom Rechner vorgehaltenen, frei programmierbaren Ein- und Ausgänge sowie ein Meßstellenumschalter zur Organisation der punktwisen Abfrage der Sensoren.

Die Vorteile, die sich für das bisher erst in einer Variante bekanntgewordene Gewichtsmessprinzip für das in allen hydrostatischen Meßsystemen abzufragende Niveau der Meßflüssigkeit ergeben, besonders in Verbindung mit einer frei programmierbaren Abfrage, werden zum entscheidenden Kriterium für den Entschluß, diese Kombination im Labor auf ihre Eignung für den praktischen Einsatz zu testen.

Alle Module, zu denen auch die als Standgefäße vorgesehenen Laborgläser mit Abflußolive zählen, werden im Labor auf Fehlerquellen und -einflüsse untersucht sowie durch eine umfangreiche Kalibrierung für den praktischen Einsatz vorbereitet.

Für denkbar unterschiedliche Aufgabenstellungen der Ingenieurvermessung mit dem Ziel der Erfassung vertikaler Verformungen wird eine universell anwendbare Meßwert-erfassungs- und -auswertungs-Software geschrieben, die in ihrer Funktionsweise erläutert wird.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse, die mit dem neu entwickelten System an zwei Stahlbrücken bei der Ermittlung temperaturbedingter Verformungen erzielt wurden, mit den Ergebnissen herkömmlicher Beobachtungsverfahren (Präzisionsnivellement) ergab eine Übereinstimmung, die je nach dem Ausmaß der äußeren Störeinflüsse für das neue System zu einer Standardabweichung für die Bestimmung einer Höhenänderung von etwa ± 0.2 bzw. ± 0.5 mm führte. Da diese Ergebnisse teilweise unter ungünstigen Umständen hinsichtlich Schwingungs- und Temperatureinflüssen erreicht wurden, darf angenommen werden, daß damit die Leistungsfähigkeit des Systems noch nicht ausgeschöpft ist. Vielmehr werden sich unter weniger ungünstigen Umständen die aus den Ergebnissen der Kalibrierung abgeleiteten Erwartungen auf eine Standardabweichung von ca. ± 0.1 bis ± 0.2 mm realisieren lassen.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- ANDERSSON, A.;KULLBJER, A. : Messen, Steuern und Regeln mit dem VC 64, Haller Verlag, 1984
- AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS HANDBOOK : McGraw-Hill Verlag 1972
- BENNING, W. : Multivariate height-control with a hydrostatic levelling-system, in : H.Pelzer and W.Niemeier (Editors) : Determination of Heights and Height Changes, Dümmler Verlag, Bonn 1987, S. 443-455
- BENNING, W.;THEISSEN, R.;WASCHKE, D. : A registering low-cost hydrostatic levelling-system, in : H.Pelzer and W.Niemeier (Editors) : Determination of Height and Height Changes, Dümmler Verlag, Bonn 1987, S. 311-323
- BRÜCKMANN, W. : Der C 64 und der Rest der Welt, DATA-BECKER-BUCH 1984
- BUSCH, W. : Untersuchung und praktische Erprobung einer rechnergestützten Präzisionsschlauchwaage, in "Kontinuierliche Messungen in der Ingenieurgeodäsie", Veröffentlichung des Geodätischen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 28, Aachen 1980, S. 55-82

BUSCH, W. : Eigenschaften stationärer hydrostatischer Präzisions-Höhenmeßsysteme für kontinuierliche Langzeitbeobachtungen untersucht an einem neu entwickelten Schlauchwaagensystem, Veröffentlichung des Geodätischen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 31, Aachen 1981

BUSCH, W. : Hydrostatische Vielstellen-Höhenmeßsysteme mit elektrischen Druckaufnehmern. IV. Internationales Symposium über Deformationsmessungen mit geodätischen Methoden, Katowice 9.-16. Juni 1985

BUSCH, W.; DAMES, W. : The dynamic response of a long pipe multipoint hydrostatic levelling system at varying environmental temperatures, in : H. Pelzer and W. Niemeier (Editors) : Determination of Heights and Height Changes, Dümmler Verlag, Bonn 1987, S.299-309

BUSCH, W.; FITZEN, H.-P. : Entwicklung und Prüfung einer kontinuierlich messenden Präzisionsschlauchwaage, in "Löschner-Festschrift", Veröffentlichung des Geodätischen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 23, Aachen 1977, S.211-222

BUSCH, W.; FITZEN, H.-P. : Ein rechnergestütztes Präzisionsschlauchwaagensystem für kontinuierliche Deformationsbeobachtungen, in : Hallermann, L.: Beiträge zum II. Internationalen Symposium über Deformationsmessungen mit geodätischen Methoden, Bonn 25.-28. September 1978, Stuttgart 1981, S.23-31

- BUSCH, W.; WITTE, B. : Überwindung heute bestehender Nutzungsgrenzen bei Biegetragwerken durch Aktive Verformungskontrolle, Forschungsbericht - IV B5 - FA 9859 Teil C für das Ministerium für Wissenschaft und Forschung NW
- DAMES, W. : Untersuchung der Eigenschaften hydrostatischer Druckmeßsysteme für die permanente Erfassung von Höhenänderungen, Das Markscheidewesen 94 (1987) Nr. 4, S.397-403
- DIN 1319 -Blatt 1-: Grundbegriffe der Meßtechnik (Messen, Zählen, Prüfen), Normen für das Vermessungswesen, DIN-Taschenbuch 111, Beuth-Verlag 1978
- DIN 4107 : Baugrund - Setzungsbeobachtungen an entstehenden und fertigen Bauwerken, Deutsche Normen, Juli 1969
- DOSS, H.; ZIMMERMANN, B. : Einsatz der Schlauchwaage für Kontrollmessungen beim Stahlbau, Vermessungstechnik (1977), S.158-159
- EICHHOLZ, K.; SCHÄFLER, R. : Zur Dynamik elektronischer Neigungsmesser (Teil I und Teil II), Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (1982), S.29-45 und S.147-158
- HAGEMANN, M. : Zur permanenten Erfassung von Verformungen an einer Turbinenanlage, Aufbereitung und Auswertung der Meßdaten, in : Hallermann, L.: Beiträge zum II. Internationalen Symposium über Deformationsmessungen mit geodätischen Methoden, Bonn 25.-28. September 1978, Stuttgart 1981, S.135-144

- INGENSAND, H. : Ein Beitrag zur Entwicklung und Untersuchung elektronischer Neigungsmeßsysteme für kontinuierliche Messungen, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C Nr. 308, München 1985
- KOCH, K.R. : Die Wahl des Datums eines trigonometrischen Netzes bei Punkteinschaltungen, Zeitschrift für Vermessungswesen 108 (1983), S.104-111
- KOCHSIEK, M. (Hrsg.) : Handbuch des Wägens, Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1984
- KOHLRAUSCH, F. : Praktische Physik 3, Tafeln, B.G.Teubner Verlag Stuttgart 1968
- LÜSSENHOP, K.-H. : Setzungsmessungen in unzugänglichen Bohrungen, Der Vermessungsingenieur (1983), S.75-80
- LÜSSENHOP, K.-H. : Hydrostatische Nivellements mit einer fest installierten Schlauchwaage beim Stadtbahnbau in Bielefeld, Hottinger-Baldwin-Meßtechnik (HBM), Messtechnische Briefe 22 (1986), S.5-10
- MASELTER, H.; STECHEMESSER, H. : Elektronisch anzeigende Präzisionswasserwaage, Technische Information Nr.4 der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Februar 1976

- MÖHLENBRINK, W. : Studie zur Entwicklung von Meßeinrichtungen zur fortlaufenden Messung und Registrierung von windinduzierten Bewegungen turmartiger Bauwerke, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B Nr. 215, München 1976
- PÖTZSCHNER, W. : Höhenmessung mit Feinbarometern, Wissenschaftliche Arbeiten des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Hochschule Hannover Nr. 7/1955
- ROHRBACH, CHR. : Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen, VDI-Verlag, Düsseldorf 1967
- SCHRÜFER, E. : Messung elektrischer und nicht elektrischer Größen, C.Hanser Verlag, München 1984
- SPETTMANN, J. : Setzungsbeobachtungen mit der "Metron-Schlauchwaage 55 nach Professor Dr. Niemczyk, Mitteilungen aus dem Markscheidewesen (1956), S.121-129
- SPETTMANN, J. : Höhenmessungen und ihre Genauigkeitsgrenzen bei Deformationsbeobachtungen unter besonderer Berücksichtigung bergbaulicher Einwirkungen, in "Geodätische Woche Köln 1975 ", Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1976, S. 137-144
- SPETTMANN, J. : Eine neue Präzisionsschlauchwaage, in "Löschner - Festschrift", Veröffentlichung des Geodätischen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr 23, Aachen 1977, S.265-270

- SPETTMANN, J. : Über Probleme bei der meßtechnischen Bestimmung von Schief lagen, IV. Internationales Symposium für Markscheidewesen, Vortrag Nr. 3.34, Band 3, S.93-101, Aachen 1979
- THIERBACH, H. : Automatische Höhenüberwachung von Turbogeneratoren mit den Meßsystemen ELWAAG und ELMESS, in : Hallermann, L. : Beiträge zum II. Internationalen Symposium über Deformationsmessungen mit geodätischen Methoden, Bonn 25.-28. September 1978, Stuttgart 1981, S.1-10
- THIERBACH, H. : Hydrostatische Meßsysteme. Entwicklungen und Anwendungen. Sammlung Wichmann Neue Folge Band 12, Karlsruhe 1979
- THIERBACH, H.; BARTH, W. : Eine neue automatische Präzisionsschlauchwaage, Zeitschrift für Vermessungswesen 101 (1976), S.470-478
- THIERBACH, H.; BARTH, W. : Die automatische Präzisionsschlauchwaage ELWAAG, Zeitschrift für Vermessungswesen 104 (1979), S.114-122
- THIEMANN, K. P. : Der Beschleunigungssensor als Neigungsmesser, Der Versuchs- und Forschungsingenieur (1984), S.43-46
- TIETZE, U.; SCHENK, CHR. : Halbleiterschaltungstechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1986

- WITTE, B. : Zur Problematik der "inneren" und "äußeren" Genauigkeit elektrooptischer Distanzmesser, Allgemeine Vermessungsnachrichten (1986), S.18-26
- WITTMANN, F. : Schlauchwasserwaage mit elektrischer Niveauanzeige. Patentanmeldung 2 739 975, 1977
- WOLF, H. : Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Dümmler-Verlag Bonn 1968
- WOLF, H. : Ausgleichungsrechnung - Formeln zur praktischen Anwendung. Bonn 1975

L E B E N S L A U F

Robert Theißen, geboren am 20. August 1947 in Mützenich, als Sohn des Gast- und Landwirtes Josef Theißen und seiner Ehefrau Josefine, geborene Zöll. Verheiratet seit dem 27. Januar 1978 mit Heide-lore Theißen, geborene Geisbusch.

AUSBILDUNG UND BERUFLICHER WERDEGANG

1954 - 1958	Besuch der Kath. Volksschule Mützenich
1958 - 1966	Besuch des Städt. St.Michael-Gymnasium Monschau Abschluß Abitur
1967 - 1968	Wehrdienst
1/1969 - 9/1969	Praktikum am Katasteramt in Monschau
10/1969 - 4/1974	Studium der Geodäsie an der Universität Bonn Abschluß Diplom am 10.4.74
4/74 - 5/74	Meßtruppführer bei einem Öffentlich bestellten Vermessungsingenieur
6/74 - 7/76	Ausbildung als Vermessungsreferendar beim Regierungspräsidenten in Köln Abschluß Assessorexamen am 15.7.76
7/76 - 9/76	Meßtruppführer bei einem Öffentlich bestellten Vermessungsingenieur
10/76 - 2/77	als Wiss. Ass. mdVb in der Arbeitsgruppe Vermessungswesen an der Ruhruniversität Bochum
seit 2/77	als Wissenschaftlicher Assistent an gleicher Stelle

